GUOJI DANWEIZHI YU JIBEN WULI CHANGSHU

国际单位制与基本物理常数

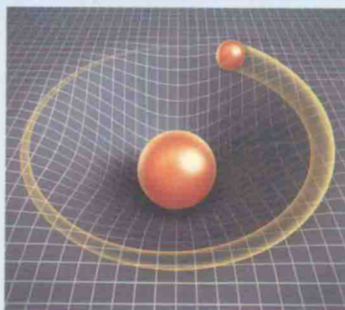
张常山 编著


东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

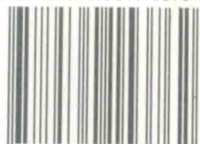
国际单位制与基本物理常数

GUOJI DANWEIZHI YU
JIBEN WULI CHANGSHU

● 张常山　编著



建议上架　大学教材


ISBN 978-7-5641-5376-2
9 787564 153762 >

责任编辑　咸玉芳
责任印制　张文礼
封面设计　顾晓阳

定价：20.00 元

国际单位制与基本物理常数

张常山 编著


东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS
·南京·

内容提要

本书首先从米制的创立出发，简要介绍了国际单位制的形成过程；然后就国际单位制中的三个基本单位——秒、米和千克的产生及演变情况作了较为详细的介绍，具体展示了基本计量单位是如何同基本物理常数发生关联的；最后就落实第二十四届国际计量大会所作出的关于采用基本物理常数重新定义国际单位制基本单位的决议所面临的问题进行了较为深入的阐述，并在结尾部分针对基本物理常数的取值问题提出了一点不同寻常的看法。

本书采用了科普式的书写方法，用词力求简单明了，便于阅读。对于从事与计量有关的工作人员和科技工作者而言，本书有助于了解国际单位制改制决定的由来、实施办法以及应该注意的问题等。对于非专业人士而言，通过阅读本书可以比较清楚地了解到日常生活中使用较多的时间单位秒、长度单位米以及质量单位千克的有关知识。

图书在版编目(CIP)数据

国际单位制与基本物理常数 / 张常山编著. —南京：东南大学出版社，2014. 12

ISBN 978-7-5641-5376-2

Ⅰ. ①国… Ⅱ. ①张… Ⅲ. ①国际单位制②物理常数 Ⅳ. ①TB91②O346. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 280975 号

国际单位制与基本物理常数

出版发行　东南大学出版社
出 版 人　江建中
社　　址　南京市四牌楼 2 号
邮　　编　210096

经　　销　江苏省新华书店
印　　刷　南京玉河印刷厂
开　　本　880 mm×1230 mm　1/32
印　　张　3. 125
字　　数　89 千字
版　　次　2014 年 12 月第 1 版
印　　次　2014 年 12 月第 1 次印刷
书　　号　ISBN 978-7-5641-5376-2
定　　价　20. 00 元

(本社图书若有印装质量问题，请直接与营销部联系，电话：025-83791830)

前　言

在日常生活中，人们离不开各种各样的单位。譬如，在考查某个家庭的生活开销时，便会涉及该家庭在一个月之内消费了多少度电、多少立方米的水和多少千克的大米等。其中“度”“立方米”和“千克”就是不同的单位。

在物理学中存在着一类被人们称作基本物理常数的物理量。所谓基本，是指这些物理量往往出现在较多的物理现象之中，起到了将这些现象内在地关联起来的作用，进而让自然界表现为一个和谐的整体。对于基本物理常数，人们普遍相信它们拥有一个不随时间、地点的改变而变化的数值。

当然，这一说法只有在基本物理常数所涉及的计量单位保持不变的情况下才是正确的。单位改变了，基本常数的数值也会跟着变化。譬如，当长度单位选用米时，真空中的光速值为 299 792 458 米/秒；而将米改为英尺时，光速值就变成了 983 571 056.43 英尺/秒。数值与计量单位之间的这种关联性，使得人们可以通过约定一些基本物理常数数值的方法来定义某些计量单位。

事实上，于 2011 年 10 月召开的第二十四届国际计量大会就作出决定，待到时机成熟时，便通过约定几个特定常数的数值来重新定义国际单位制中的基本单位。届时，将国际科学技术数据委员会所推荐的有关结果指定为这些常数的绝对精确值，进而精确地定义出一些基本单位的大小。之所以选用国际科学技术数据委员会提供的数据，源于人们相信由该机构通过审慎评定而得出的结果最为可靠。

显然，上述方案并未虑及国际科学技术数据委员会所提供的数据也可能存在误差的问题。其原因是，这一误差的存在只是让新定义的单位在量值上与原有单位之间产生一定的偏离而已。由于单位的定义本来就不存在某种客观约束，仅仅取决于人们的主观意愿，因此新

旧单位之间即便出现了一些偏离也不是什么大问题。

不过，换个角度看，情况似乎有些不同。尽管一个基本物理常数可以出现在众多的物理现象之中，但从总体上看，每个常数都有其侧重的领域。这些领域作为大自然的一个个组成部分，彼此间应该存有一定程度或一定层面上的协调性。这种协调性本质上要求有关常数之间保持一种相互协同的关系，进而限制了对单个基本常数进行独立赋值的自由。如此说来，在协同性的框架下，有可能为基本物理常数确定出一个客观性数值，而不必仅仅依赖于实验测量。

本书简单介绍了国际单位制中与人们的日常生活息息相关的时间、长度和质量的基本单位的产生、发展及完善的大致情况，通过实例展示了基本物理常数同计量单位之间的密切联系。最后对于基本常数的实验测量和理论推算所涉及的一些问题进行了阐释，并介绍了几项观察结果。

目　　录

第1章 国际单位制

1.1 单位与单位制

所谓单位，简单地说，就是汉语中的量词。

追根溯源，单位产生于计数过程。

例如，想要知道某只桶里装有多少水，就要对水进行计数。具体做法是选定一种小的容器，譬如一只小茶杯，用它将桶里的水一次次地舀出来，同时记下所舀的次数，直到水被舀完为止。最终的次数表示了水的数量，而小茶杯便是通常所说的单位。

何谓单位制？

简单地说，就是关于各种单位如何选取的一种规定。

单位的选取，完全听凭于人们的喜好或习惯。以舀水为例，既可以选择小茶杯，当然也可以选择其他的小型器具，如小酒盅或小瓷碗等。不同的选择意味着选取了不同的单位，进而形成不同的单位制。这方面的一个典型例子是长度。若将其单位取为“码”，是为英制；取为“尺”，是为市制；而取为“米”时，则为公制或米制。

就科学研究而言，单位制还包含着另一层意思。以物理学为例，在众多的分支领域中，涌现出了许许多多的物理量。粗略地看，似乎每一个物理量都应该被赋予一个独一无二的单位。实则不然。因为通过实践人们发现，虽然物理量众多，但是能够将不同物理量关联起来的物理学公式也很多，一一核算下来，真正具有独立性的物理量仅有少数几个。一旦选定了这几个物理量并赋予某个单位，那么其他物理量所带单位均可以利用这几个单位的特定组合表示出来。至于要将哪些物理量挑选出来作为独立性参量，又以何种方式规定其单位，同样听凭于人们的喜好或习惯。人们按照自己的意愿每作出一种选择，便给出了一种单位制。因此在物理学的发展进程中，曾经出现过

厘米·克·秒制(CGS 制)、绝对静电制(CGSE 制)、绝对静磁制(CGSM 制)、高斯制、原子制等多种单位制。

1.2 单位的选择

在人类社会的发展进程中,最早被赋予单位的,是与人们的日常生活息息相关的长度、重量、时间等。那么早期的单位具有什么样的特点呢?

以长度为例。在三国时期(公元三世纪)王肃所编撰的《孔子家语》一书中就著有“布指知寸,布手知尺,舒肘知寻”。由此可见,早期的长度单位“寸”、“尺”和“寻”均取自人体上肢的某一部分。在西方同样如此。例如英制中的“码”(yard),原本取自手臂水平侧向伸直时,从一个男人的鼻尖到其中指指尖的距离。

以上述方式制定单位,其好处显而易见:每个人都可以身体力行地感知各种单位的实际大小,省却了权威部门为宣传、普及单位所需花费的大量人力和物力。就单位本身而言,则表现出了简便易行的优点。

不过,简便归简便,存在的问题也不小。以“码”为例,不同身材的男人,其鼻尖到中指指尖的距离必定不同,那么应该参照哪个男人的身体来制定“码”的长度呢?与此同时,选择这个男人的正当性又如何呢?

别的不说,这个男人最起码要具有足够高的权威性才行。如此说来,只有国王才有资格担此重任。可问题是,国王的寿命是有限的,一旦去世,支撑有关规定的原始依据便永远消失了。以后如果就单位问题产生纷争,将很难妥善解决。鉴于此,在公元 1150 年,苏格兰国王戴维一世就作出决定:将三个身材分别是高大、中等和矮小的男人的大拇指宽度的平均值设定为英寸,同时将 36 英寸指定为 1 码。

作出如此规定虽然解决了单位出自何处的问题,但并没有封堵住某些漏洞。例如,生活在不同地区的人们,其身材往往存在着整体性的差异。因此,按照上述办法确定出来的“码”不可避免地带有地区色彩。其结果是,虽然叫着同样的名字,但是此“码”非彼“码”也,从而导

致不同地区的人们实际上使用着大小不一的单位。而单位的不统一，轻则给人们的日常生活带来不便，重则将造成一些比较严重的后果。关于后者，十多年前就曾出现过一例。

1998 年 12 月 11 日，美国国家航空航天局在佛罗里达州卡纳维拉尔角发射场，用德耳塔火箭将一个用于研究火星气候和气象的宇宙飞船——火星气候轨道器(MCO)发射升空。经过长达九个半月的长途飞行后，飞船于 1999 年 9 月 23 日进入到环绕火星的轨道。这时，按照预先制订的计划，飞船的主引擎被再次启动，目的是让飞船改变运动姿态，斜向下方以掠过火星表面的方式飞出去，以便发回有关火星大气层及其气候的重要数据。但是点火指令发出后，地面人员迟迟未能接收到预期中的数据。不久之后，与飞船之间的通信联系也中断了。事后查明，飞船再次点火后并没有像预先计划的那样紧挨着火星的表面飞出去，而是坠毁在了火星上。之所以出现这样的结果，直接的原因是飞船距离火星表面的实际高度比预先设计的数值偏低了 96.6千米。

为什么会出现这样的结果？难道预先制定的方案有问题吗？

于是，美国国家航空航天局组建起一个调查委员会来分析事故产生的原因。结果发现，事故源于控制飞船日常运转的洛克希德马丁公司提供给美国航天飞行控制中心的有关火箭助推器的数据使用的是英制单位，而控制中心以为自己接收到的数据像国际间通行的做法那样，使用的是国际制单位。结果存在于英制与国际单位制之间本不算很大的偏差，直接导致了飞船偏离预定轨道 96.6 千米，进到一条自杀性轨道里去了，并最终坠毁在火星的表面上。事故调查委员会给出的结论称：

> 火星气候轨道飞行器事故调查委员会已确认，火星气候轨道器飞船失败的根本原因是用错了度量单位。

就这样，价值 1.25 亿美元的航天器，九个半月的测控努力，以及之前为这个项目所开展的大量预备性工作就因为计量单位上出现的差错而报废掉了。

关于计量单位，生活在两千多年前的秦始皇就认识到了“字同文，

车同轨”的重要性。在他消灭了其他六国之后，便开始致力于在全国范围内推广统一的度量衡制度。为此，秦始皇采取了一种本质上属于强加于人的方法，其结果是用时短、见效快。但是这种带有强权色彩的办法对于一般的统治阶层而言，轻易不会使用。于是，如何让人们放弃久已习惯的计量单位，转而接受一套陌生的度量衡制度是一个颇费思量的问题。

对此，发生在十八世纪末的法国大革命催生出了一个很好的想法：让度量衡拥有普适性的特点，它既不是某个国家、地区或民族的特定物，也不存在让某个国家、地区或民族占有某种先机的可能性，因而实施起来就不会让人产生强烈的抗拒心理。能够集中表达出以上想法的，是夏尔·莫里斯·德塔列朗-佩里戈尔（C. M. de Talleyrand-Périgord）所发表的如下声明：

> 为了能够实现度量衡的一致性，就必须制定自然的和不变的质量单位。而将这种一致性推广到其他国家并敦促他们也赞成这一计量系统，唯一的办法就是让所选取的单位不是任意的，而且不含地球上任何民族的任何特定物。

创生于十八世纪末的米制很好地实现了上述构想。

1.3 米制的建立

所谓米制，是指长度用米，质量用源于米的千克作单位的一种计量制度。

米制起源于法国。

法国人之所以能够率先建立起米制这一计量制度，其原因有两个：第一，在十八世纪的法国，各个地区所使用的计量单位均不相同。一个曾经去过法国的英国人就抱怨说：“法国计量单位的混乱简直令人难以想象，不仅各个省不同，各个地区不同，就连各个城、镇都不尽相同。”根据有关资料，当时出现在法国境内的计量单位多达 25 万个。这种状况给生活在不同地区的人们开展文化交流和贸易往来造成极大的不便。因此在大革命前的 1788 年，大约有 128 份地区会议报告要求统一计量单位，约有上千份的村镇会议报告支持在法国全境建立

起统一的度量衡制度。第二,1789 年爆发的大革命,在法国各地营造出了一种前所未有的狂热气氛。普通民众所表现出来的高涨的革命热情为科技工作者摆脱传统束缚,建立起新的计量体系提供了一个千载难逢的大好机会。

因此,在大革命爆发后的次年,即 1790 年,德塔列朗-佩里戈尔就向新成立的法国国民议会建议,将摆动周期为 1 秒的单摆(简称秒摆)摆线的长度规定为长度的基本单位。不过,从物理学的有关知识中可以了解到,在摆动周期保持一定的情况下,摆线的长度与单摆所处位置的重力加速度密切相关。而影响重力加速度的因素有很多。因此从一个比较广阔的区域来看,秒摆的线长并不具有统一性,不适合作为长度基准。

于是德塔列朗-佩里戈尔的建议遭到了法国科学院的反对,该院倾向于另一项建议——将长度基准与地球子午弧的长度联系起来。经过慎重考虑,法国科学院于 1791 年 3 月 19 日正式决定,将法国敦刻尔克海口与西班牙巴塞罗那连线所在的地球子午弧长度的一千万分之一作为长度的基本单位,取名“米”。同月的 26 日,法国国民议会批准了科学院作出的上述决定。

接下来便是对指定的子午弧展开测长工作。1792 年 4 月,法国外交部就有关事项与西班牙政府达成一致。科学院方面,为加快工作进度,同时也是为了让测量结果有个内部参照,决定将拟定的子午弧划分为南、北两段。其中南段位于罗德兹和巴塞罗那之间,由麦卡恩(Méchain)负责;北段位于罗德兹和敦刻尔克之间,由德拉布里(Delambre)负责。1792 年 9 月 7 日,法国国民议会通过投票,正式任命德拉布里和麦卡恩为人民政府特使,同时命令各地方政府对他们的测量工作予以积极配合。之所以提出这样的要求,是因为当时的法国正处于大革命时期,政局比较混乱,村镇一级的民兵组织活动猖獗。如果得不到地方政府强有力的支持,不要说测量工作能否正常开展起来需要打个问号,就连测量人员的人身安全能否得到保障都是一个问题。事实上,由德拉布里率领的测量队就曾经几次置身于非常危险的境地。

尽管事先有了一定的思想准备，但是测量任务实际的艰巨性还是大大出乎当事人的意料。例如，作为南线负责人的麦卡恩，在动身前往西班牙时，曾预计用时 7 个月就能够完成任务而回到巴黎。结果耗费了 7 年时间，直到 1799 年才得以完成任务。

作为整个工作的一部分，在此之前的 1798 年 6 月，在数学兼天文学家拉普拉斯(Laplace)的催促下，法国科学院向荷兰、丹麦、瑞士、西班牙和意大利等国的有关学者们发出了信函，邀请他们来巴黎一同商讨“米”的产生问题。法国科学院之所以邀请来外国学者，目的是为了防止其他国家对于由法国单独确定出“米”的长度心怀忌妒或不满，进而懈怠于“米”的宣传和推广工作。

1798 年的 9、10 月间，受到邀请的各国学者们陆续来到巴黎。但是直到 1799 年的 2 月份，他们才见到由德拉布里提交的敦刻尔克至罗德兹一线的测量数据。麦卡恩提交数据的时间则更晚，拖延到了 3 月 22 日。此后，学者们对两个人的测量数据进行了仔细的计算分析，结果发现了一些问题。例如，从新数据中得出的地球偏心率约为 1/150，是原有数值 1/334 的两倍多。面对这个意想不到的新情况，学者们经过激烈讨论，最终认定 1/150 的偏心率只是反映了所测子午弧的个别情况，而原有数值 1/334 更符合地球的整体情况，因此应该选用 1/334 而非 1/150 的偏心率来确定“米”的长度。最终得出该长度若采用巴黎当时使用的长度单位“分”来表示的话，等于 443.296 分。

接下来便需要制造出表征“米”长度的实物器具。这项工作又涉及一些具体问题。譬如，该器具应该选用何种材质打造，外形上应采取怎样的几何形制等。学者们最终决定，选用金属铂，打造出横截面为矩形，左、右两端之间的距离正好等于 1 米的长杆状物件。打造任务最终交给英国人勒努瓦。因为此人不仅是伦敦城里最好的仪器建造师，而且更为重要的是，由他发明的比长仪的精度能够达到百万分之一“突阿斯”，即现如今的 1.8 微米。勒努瓦花费了两个多月的时间才将法国科学院提供的 4 根铂杆打造成了长度均为 1 米的尺子，并从中挑选出最接近“米”的规定值、相对误差仅有 0.001%的那根作为标准用尺。

1799年6月22日，法国科学院举行盛大仪式，将勒努瓦选取的标准米尺交给法国国民议会。国民议会随后将该尺存放于法国档案局，史称"档案米"(Metre des Archives)。1799年12月10日，国民议会颁布法律，将"档案米"规定为长度原器。至此完成了对长度单位米的定义工作。

关于质量，其实早在1795年4月7日，法国国民议会就曾颁布过一项法律，规定在冰点(即0℃)时体积为1立方厘米的纯水所具有的绝对质量为1克。所谓厘米，乃1米长度的百分之一。不过，那时子午弧的测量工作远没有完成，米的精确长度还是个未知数，出现在上述规定中的厘米是如何得来的呢?

原来，在更早的1793年，应大革命政府的要求，法国科学院计量委员会就拟议中的米计算出了一个大致的数值。1793年8月1日，国民议会将该数值规定为"临时米"。既有了"临时米"，自然就有了分米、厘米等单位。

事后人们发现，水的密度在4℃时具有最大值。于是法国国民议会便修改了原先的规定，转而将4℃时体积为1立方分米的纯水所具有的绝对质量规定为1千克，并作为质量的基本单位使用。1799年6月22日，纯铂材质的千克砝码制作完成，后来送存于法国档案局，史称"档案千克"(Kilogramme des Archives)。同年的12月10日，法国国民议会颁布法律，将"档案千克"规定为质量原器。就这样，关于质量单位的定义工作也宣告完成了。与此同时，也宣告了米制的诞生。

1.4　国际计量大会与国际单位制

自诞生之日起，米制就缓慢而坚定地在世界各地推广开来。

首先是在欧洲的几个低地国家实行，如荷兰、比利时、卢森堡等，紧接着在西班牙、葡萄牙、意大利等国实行。1848年至1863年间，位于美洲的智利、哥伦比亚、厄瓜多尔、墨西哥、巴西、秘鲁和阿根廷等相继实行了米制。1864年，英国开始允许米制与英制单位并行使用。到了1868年，德国也宣布自1872年1月1日起采用米制。

但在学术界，米制的情况却不容乐观。诸如这一计量制度究竟是

法国的还是世界的？是自然的还是历史的？是科学的产物还是法律规定的结果？是来自地球抑或只是人造的一根尺子和一块砝码？诸如此类的问题，在每年召开的国际大地测量会议上，都引起学者们的激烈争论。除此之外，还有一个很现实的问题。由于作为基准的"档案米"与"档案千克"被法国国家档案馆保存着，因此凡是采取了米制的国家若想检验自己保存的长度和质量基准是否准确，都不得不请求法国人帮忙。久而久之，有人便产生了成立一个国际性机构来负责处理与计量有关的问题的想法。

1867 年，在法国巴黎举办的世界博览会期间，一些学者自发创建了度量衡与货币委员会，负责推动度量衡与货币制度在全世界范围内的统一。鉴于此，1869 年，由法国政府出面，邀请多个国家派出代表来巴黎一同商讨"如何维护米制的普遍性，如何为这种普遍性确定出一个国际化的运作模式，如何在与'档案米'和'档案千克'保持一致的基础上满足各国科学发展的需要"等问题。

然而，计划中的国际会议尚未召开，法国与普鲁士之间就爆发了战争。其结果是法国战败，拿破仑三世被迫下台，法国又恢复了共和体制。1872 年，新成立的法兰西共和国再一次邀请各国学者来巴黎商讨与米制有关的问题，结果有 30 个国家派出了代表团。通过讨论，代表们最终决定，参照巴黎档案局所保存的"档案米"和"档案千克"制造出一批新的米尺和千克砝码，分发给与会各国作为原器使用。

关于拟议中的米尺和千克砝码，代表们决定采用含铱 10%的熔融铂铱合金来打造它们，并且米尺的横截面要采取近似于"X"的形状。所谓近似，是指对应于"X"中的交点是一个水平的平台，其上刻有两条平行线段，彼此间的距离正好等于 1 米。这样的设计相对于原先的"档案米"而言有了很大的改动。之所以如此，是因为人们发现"档案米"在与各种工作基准进行频繁比较的过程中，左、右两个端面均受到了轻微的磨损。

1875 年 3 月 1 日，法国政府再一次召集了有 20 个国家参加的"米制外交会议"。此次会议不仅批准了前次会议所作出的有关决定，而且在会议的最后阶段，继续留在会议上的 17 个国家的代表正式签署

了《米制公约》。公约规定从此以后通过召开国际计量大会的方式处理与计量有关的重大问题，并决定组建国际计量委员会，下设国际计量局作为其常务机构。出于种种考虑，法国方面慷慨地将位于巴黎的布雷特依宫捐献出来，用作拟成立的国际计量局的办公场所。

国际计量委员会一成立便立即着手打造原计划中的米尺和千克砝码。关于米尺，截止到1887年，一共打造出了31件样品。通过检定，发现编号为No.6的那根在0℃时最接近“档案米”的长度，于是国际计量委员会将其确定为国际米原器，简称“国际米”。其余30件样品，虽然在准确性上略逊于“国际米”，但是其刻线间距与1米之间的偏差均极其微小。

关于千克砝码，前后共制作了两批。第一批仅有3件，分别称为KⅠ、KⅡ和KⅢ（从理论上讲，千克砝码应该被设计成圆球形，因为在同等体积下，球体的表面积最小，意味着外界的影响面也最小。但是鉴于球体在加工、调准以及使用方面的诸多不便，千克砝码最终被设计成了高度和直径均为39毫米的圆柱体）。1880年，由四位观察员在巴黎天文台将经过抛光及校准后的KⅠ、KⅡ和KⅢ与“档案千克”分别进行了比较，发现其中的KⅢ最接近“档案千克”的质量。1883年，国际计量委员会决定将KⅢ选为千克基准，起名“国际千克”。其余两件以及第二批制作出来的40件砝码与“国际千克”之间的偏差均未超过1毫克。

1889年9月24日至28日，第一届国际计量大会在法国巴黎顺利召开。大会批准了以“国际米”和“国际千克”为基础的长度和质量单位的定义。大会期间，国际计量委员会决定将KⅠ和编号为No.1的砝码作为“国际千克”的两个作证原器，并按照“国际千克”的条件予以保存；将编号为No.9和No.31的这两块砝码交给国际计量局作为工作原器；将No.7、No.8、No.29和No.32这4个编号的砝码留作备用；其余34件（包括KⅡ）连同30根米尺一起通过抽签的办法分发给《米制公约》的签约国，充当这些国家的长度和质量基准。

在第一届大会之后，又陆续召开了20多次国际计量大会，针对不同时期出现在计量领域里的特定问题展开讨论并作出相关决议。历

届会议的大致情况汇总于附录Ⅰ。

从单位制的角度看，第一届国际计量大会批准了以“国际米”和“国际千克”为基础的长度和质量单位的定义，意味着基于米和千克的米·千克·秒制(MKS)就被正式建立起来了。此后的主要进展发生在1948年，于该年10月12日至21日召开的第九届国际计量大会责成国际计量委员会制定出一种所有《米制公约》签约国都愿意采用的实用型单位制。6年后召开的第十届国际计量大会决定，采用长度，米(m)；质量，千克(kg)；时间，秒(s)；电流，安培(A)；热力学温度，开氏度(℃K)和发光强度，坎德拉(cd)这6个物理量及其单位组成“实用单位制”。1960年，在第十一届国际计量大会上，“实用单位制”被正式命名为“国际单位制”，简称SI。

再往后，出于对化学现象根植于分子、原子和离子的个体实在性，因而对于化学物质而言，其含有的基本组成单元的数量是一个比其质量更为重要的概念这一考虑，有学者建议在国际单位制中添加上描述化学物质所含基元的多少这样一个物理量。最终，于1971年召开的第十四届国际计量大会决定将“物质的量”及其单位“摩尔”吸收进国际单位制。至此，包含着7个基础物理量及其单位的国际单位制就被定型下来了。

从1971年至今，40多年的时间过去了，虽然从形制上看，国际单位制并未发生任何变化，但在具体内容上，却有了很大的改变。回顾一些单位，特别是与人们的日常生活息息相关的时间、长度和质量单位的产生、发展直至完善的过程，可以从一个侧面很好地了解近现代以来计量技术所取得的长足发展，以及物理学在这一发展进程中所发挥的巨大作用。

第 2 章　秒的产生及演变

2.1　机械钟与约翰·哈里森的故事

对于人类而言，时间的概念与生俱来。

地球的自转及其围绕太阳的公转，为生活在地球上的人们带来了日起日落、寒来暑往等周期现象。再加上月亮的朔望盈亏变化，使人们在不知不觉中就产生了“年”“月”“日”等时间概念。再后来，随着人类社会的进步以及生活节奏的不断加快，慢慢产生了对于更小时间单位的需求。根据文字记载，至少在公元前 102 年，人们就已经将 1“日”均匀地划分成 12 个“时辰”，每个“时辰”还被划分成若干个“刻”。

在西方，比“日”小的时间单位是“小时”，比“小时”更小的单位有“分钟”和“秒”。彼此间的换算关系是 1“日”等于 24“小时”，1“小时”等于 60“分钟”，1“分钟”等于 60“秒”。

从计量上看，将时间准确到“小时”并不困难，古人所采取的很多办法都可以做到这一点。从“小时”过渡到“分钟”则不太容易，要等到摆钟被发明之后。而从“分钟”过渡到“秒”，则困难重重。从历史沿革上看，有几位杰出人物值得人们永远铭记，他们为人类最终跨入“秒”时代做出了不可磨灭的贡献。

第一位是生活在我国北宋时期的苏颂。公元 1088 年，他建造出了水运仪象台。利用一个被称作“天衡”的构件，将水流驱动“枢轮”所产生的连续性运动转变成一种间歇式跳跃运动，进而将时间的流逝均匀地表现出来。苏颂所设计的天衡，其实就是后来大量出现在机械钟表里的“擒纵机构”。

擒纵机构是天衡的设计理念通过十字军东征传播到欧洲后结出的果实。1656 年，荷兰籍物理学兼数学家惠更斯(Christian Huygens)将擒纵机构与单摆的等时性原理相结合，绘制出了机械摆钟的设计图纸，并授权身处海牙的钟表匠人萨洛蒙·科斯特加以制造。按

照惠更斯的设计制作出来的摆钟，其走时精度达到了一天仅误差几十秒的水平，与先前的机械钟表动辄出现 20 多分钟的误差相比，可以说是发生了一次质的飞跃。1658 年和 1673 年，惠更斯分别出版了《钟表学》和《摆钟》这两本著作，书中进一步讨论了与摆钟密切相关的一些问题，从而有力推动了摆钟制造技艺的提高。

此后，随着航海业的兴旺发达，出现了对于远洋航船进行精确定位的强烈需求。所谓定位，就是在缺乏陆地参照物的茫茫大海中，准确测量出船只所在地的地理经纬度。其中，纬度的测量并不困难，只要把一种称为象限仪的仪器水平放置，再令其一端对准北极星，尔后读出该星与水平面之间的夹角就可以了。但是采取这个办法测量经度就不行了，因为随着地球的转动，与特定经线相对应的天体时时刻刻都在变换着。

不过，正因为地球在一刻不停地匀速转动着，才使得运用另一种方法测量出远洋航船的经度成为了可能。

众所周知，地球的自转周期为 24 小时，换算成角速率，为 15 度/小时。这个数值意味着，如果将一只走时精准的钟表从甲地带往相距不算遥远的乙地，那么当乙地的太阳到达上中天时，钟表显示的时间若为下午 1 点，则乙地就处在甲地以西 15 度的经线上；显示的时间若为上午的 11 点，则乙地处在甲地以东 15 度的经线上。由此可见，只要测量出两地间的时间差，便可以轻而易举地计算出两地间的经度差。在规定了零度经线所处的位置后，通过上述办法便可以确定出每一个地方的绝对经度值。

显然，在所述办法中，钟表的走时精度直接决定着经度值的精确度。那么，计时钟表的精度要达到何种水平才能满足远洋定位的要求呢？

从实际情况看，远洋船只对于目的地的偏离不宜超过 50 千米。若将这个距离换算成经度差的话，其结果将随着纬度的增大而增大。也就是说，在赤道附近将给出最小的数值——大约为半度。如前所述，地球在 1 小时内转动 15 度，即每 4 分钟转动 1 度。由此看来，半度就是 2 分钟的时间。

表面上看,2分钟是一个很宽松的要求,不难达到。实则不然。因为在十八世纪,远洋船只的航行速度普遍比较缓慢,去往一个相距不太遥远的地方都需要花费较长的时间。以当时英国海船经常光顾加勒比地区为例,从伦敦到达加勒比海域大约需要40天的时间。若想在这40天里随时都能够根据钟表所显示的时间准确推算出船只所处的位置,那么前述的2分钟就是一个总误差,必须平摊到这40天里,平均每天只有短短的3秒钟。这一结果便是远洋定位对于钟表的走时精度所提出的要求。

就当时的情况看,想要制造出一款如此高精度的钟表几乎是不可能的。因此指望有哪个钟表匠人凭着自己的兴趣,冒着倾家荡产的风险来做这件事也是不可能的,必须要有来自外部的强大推动。最终,发生在1707年的一起海难充当了这一角色。

1707年10月,英国的一支舰队在地中海打败了法国舰队后凯旋时,由于误判了自己的位置,在锡利群岛附近不幸触礁,最终酿成了4艘舰船沉没,1 600多名水手葬身海底的惨剧。痛定思痛之后,英国国会采取了行动,于1714年成立了经度委员会,负责解决远洋航行中经度的测量问题,并为此通过了一项所谓的“经度法案”。该法案规定凡有办法在地球赤道上将经度确定到半度以内的人,均可获得2万英镑的奖励;如果误差稍稍超出了半度,也可以考虑给予一半的奖金。

出生在英国约克郡的木匠约翰·哈里森(John Harrison)从小就对钟表制作表现出了浓厚的兴趣。在他19岁的那一年(1713年),无师自通地制作出了一架摆钟。其中,除了几个非用金属不可的零件外,其余零件都是用木头制成的,展现出哈里森所具有的高超的木工技艺。在随后的1715年和1717年,哈里森又分别制作出了两架类似的摆钟。通过这两款摆钟的制造,哈里森彻底了解了造成摆钟出现走时误差的症结之所在,并因此设计出了一种新型的擒纵机构“蚂蚱”——因其外形酷似蚂蚱腿而得名。“蚂蚱”的特点是在运行过程中几乎不产生摩擦力。另外,他还解决了因热胀冷缩而导致的摆锤长度的改变对摆动周期的影响问题。

借助以上技术,哈里森花费两年的时间为当地一位爵士建造起了

一座木质塔钟。经过仔细校验后发现，该钟在1个月的时间里所产生的误差不超过1秒。更令人惊奇的是，这座塔钟到现在居然还在正常工作着，自建成以来的300年间，只因为塔楼装修的缘故而被迫停摆过一次。木质构件运转这么长时间仍完好无损，实属不易。

积累了丰富的经验之后，从1727年起，哈里森便开始致力于航海钟的研究。此时对他而言，所面临的主要问题是如何解决船只的晃动对摆钟走时所造成的影响。经过长达4年的艰苦探索，哈里森终于构思出了一种被称为“平衡摆”的装置——两头各用一根弹簧连接起来的两只摆的组合体。他坚信这种设计能够很好地规避船只晃动所造成的影响，眼下欠缺的只是将设计转变成实物所急需的资金而已。

为此，哈里森来到伦敦寻找经度委员会，希望获得后者的经费支持。由于该委员会只有组织形式而没有专门的办公地点，因此哈里森的找寻无果而终。万般无奈之下，只好前去拜访伦敦城里他所唯一知道的人——格林尼治天文台台长哈雷。哈雷热情地接待了哈里森，并明确告诉他经度委员会里只有三类人——天文学家、数学家和航海家，没人看得懂他的设计图纸。言下之意，经度委员会里缺少慧眼识珠的人，即便是哈里森寻找到了经度委员会，也将于事无补。不过哈雷同时还给哈里森提出了一个建议，让他去找找当时伦敦城里最负盛名的钟表匠人，同时也是英国皇家学会会员的乔治·格雷厄姆，说不定从此人那里会有些收获。

哈里森听从了哈雷的建议，并寻找到了格雷厄姆。后者仔细察看了哈里森的设计图纸后，立刻意识到它的重要性，并同哈里森展开了长时间的讨论——从上午的10点钟一直持续到晚上的8点。最后格雷厄姆以无息贷款的方式借给哈里森200英镑。虽然名义上是借款，但是格雷厄姆告诉哈里森不用急着归还这笔钱。

带着借来的这200英镑一回到家中，哈里森便同弟弟一起开始了艰苦的研制工作。直到5年后的1735年，兄弟俩终于制作出了第一台样钟。两个人之所以花费了这么长的时间，主要是因为在此期间，他们要利用村子旁边的河流和自家的壁炉反复测试摆钟抗击船只晃动以及环境温度起伏不定的能力，直到测试结果令他们满意为止。

哈里森兄弟制造的首台样钟后来被称作 H1，重达 42 千克。H1 被搬运到伦敦后，原先借钱给哈里森的格雷厄姆立即邀请了 5 位英国皇家学会的会员前来参观（其中就包括了格林尼治天文台的哈雷台长）。这 5 个人对 H1 展开了细致的考察，认为其性能优良，于是联名给经度委员会书写了一封热情洋溢的推荐信。

带着这封信，哈里森终于联系上了经度委员会。最终的结果是，委员会决定出资对 H1 展开远洋测试。1736 年，哈里森携带 H1 登上了前往葡萄牙里斯本的“百夫长”号军舰。在航行过程中，“百夫长”号船长用铁钩将 H1 吊挂在自己休息室的顶棚上，以减轻军舰晃动可能给 H1 带来的影响。军舰去往里斯本时比较顺利，但在返航途中却遭遇到了暴风雨天气，以致于在海上飘荡了一个多月后才靠近英国。就在船长认为到达了达特茅斯附近的斯塔特而准备靠岸时，哈里森提出了不同意见。因为根据 H1 所推算出的经度结果表明，军舰正处在彭赞斯半岛上的利泽德附近，而非达特茅斯附近的斯塔特。事后证明，哈里森的推算结果是正确的，说明 H1 的性能达到了远洋定位的要求。

1737 年 6 月 30 日，经度委员会的 8 名委员聚集在一起听取哈里森关于 H1 这次远洋测试情况的报告。原以为哈里森会充分描述 H1 所表现出来的优点，进而要求经度委员会同意自己携带 H1 前往加勒比海展开进一步的测试，以便获得经度法案所允诺的奖金（H1 所能达到的精度足以让哈里森获得 2 万英镑中的一半，但是前往加勒比海进行测试是获得奖金的先决条件）。但是哈里森并没有那样做，在报告中他反而指出了 H1 的种种不足，并认为自己完全有能力解决这些问题。因此，他向经度委员会申请一笔新的研制经费，以便制造出一款性能更加优良的航海钟。

根据经度法案的有关规定，经度委员会有权向提出可行性方案的穷人预支奖金作为其研制经费。因此委员会同意了哈里森的请求，拨付给他 500 英镑。利用这笔钱，哈里森花费了 3 年时间，制作出了第二台样钟，史称 H2。相比于 H1，哈里森在 H2 里安装了一个灵敏的温度补偿器，同时还改进了时钟的驱动系统，并把部分木质零件改为

了铜质。这样一来，虽然 H2 的个头比 H1 小，但比 H1 更为沉重。H2 被制造出来后，受限于当时的客观情况（英国与西班牙正处于交战状态），经度委员会没有立即安排哈里森携带上 H2 进行远洋测试，而是在陆地上有针对性地开展了一系列的试验。结果表明，H2 完全经受得住远洋航行的考验。因为，陆上试验所设置的某些条件甚至比航海中可能碰到的状况更为苛刻。

按照常理，哈里森这一次可以放心大胆地申请经度奖金了。然而，他再一次做出了超乎常人想象的举动——再次向经度委员会申请研制经费。原因是在试验当中，哈里森突然意识到自己在设计 H2 时，并没有考虑到船只在急速转弯时所产生的离心效应。再次申请研制经费的目的，就是为了制造出一款能够消除此种效应的摆钟。

经度委员会同意了哈里森的请求，再次拨付给他 500 英镑。在儿子威廉·哈里森的帮助下，哈里森立即着手新型航海钟的研制工作。谁知这一次的进展极不顺利，不得不一而再、再而三地向经度委员会申请延期以及更多的经费支持。不过，经度委员会每一次都满足了他的要求：总共 5 次，每次拨款 500 英镑。直到 1757 年，新型航海钟终于被制作完成，史称 H3。

颇为遗憾的是，虽然历经 19 年，花费了高达 2 500 英镑才制作完成，但 H3 却从未进行过正式的远洋测试。原因是在 H3 即将完工的前两年，即 1755 年，哈里森发现其他钟表匠人利用其制作 H3 时所发明出来的一些技术而制作的怀表，其走时精度能够达到非常理想的水平。于是他立即着手制造一块航海用的怀表。

在 H3 制作完成后的两年，即 1759 年，该怀表也制作完成了，史称 H4。哈里森原本打算将 H3 和 H4 一起带往加勒比海进行远洋测试，然而——按照哈里森的说法——由于皇家天文台第三任台长詹姆斯·布拉德利及其好友天文学家马斯卡林的恶意阻挠，直到 1761 年的 11 月份，哈里森的儿子威廉·哈里森才在朴次茅斯港等来了由经度委员会安排的皇家海军“德普福德”号战舰。这时，威廉决定只携带 H4 登船，而令 H3 永远失去了进行远洋测试的机会。

“德普福德”号战舰前往的目的地是牙买加。因为风浪的原因，船

只航行了 81 天之后才靠岸。上岸后，随行的一位天文学家利用自己携带的望远镜确定出了当地的正午时刻，再结合已经知道的经度数据，推算出了 H4 应该显示的时间。当人们在指定时刻关注 H4 实际给出的时间时，发现后者仅仅误差了 5 秒钟，这意味着 H4 平均每 16 天才累积出 1 秒钟的误差。这一结果表明，H4 的走时精度远远超出了经度委员会所提出的要求。

H4 的出现，标志着人类社会从此真正进入了“秒”时代。

2.2　长短不一的一天

自从约翰·哈里森制造出了 81 天里仅仅误差 5 秒钟的怀表之后，“秒”就成为了一个实实在在的时间单位。在这种情况下，法国科学院于 1820 年作出如下规定：

1 秒等于太阳日长度的 1/86 400。

这是出现在历史上的首个关于“秒”的正式定义。

一般人可能并不十分理解出现在上述规定中的“太阳日”这个概念。其实就是人们通常所说的“天”，泛指前后相继的两个正午时刻所间隔的时间。何为正午？乃太阳光垂直照射地面的瞬间，又称上中天。

如上所述，起初人们利用太阳的运动来检定钟表的走时精度。然而，一旦钟表的精度得到了确认之后，人们反过来也可以利用钟表的走时来研究太阳运动所具有的特征。结果发现，太阳的周日运动其实并不稳定，“太阳日”的长度每天都在以极微小的幅度变化着。

这一发现明显不同于人们的直观感受。在一般人的直观感受中，尽管夏季昼长夜短，冬季昼短夜长，但是由昼、夜相合而成的 1“天”，即一个“太阳日”的长短则固定不变，与春、夏、秋、冬四个季节的更替无关。但事实并非如此，一年中最长与最短的 1“天”相比，多出了近 51 秒钟。

造成这一结果的原因是多方面的。首先，地球围绕太阳公转的轨道呈椭圆形，太阳处在椭圆的一个焦点上。因为椭圆不是圆，椭圆的焦点亦非圆的中心，所以太阳与地球之间的距离时时刻刻都在变化

着。根据开普勒第二运动定律，当太阳与地球之间的连线变短时，地球的公转速度便会加快；反之，地球的公转速度便会减慢。具体说来，当地球距离太阳最近，即在近日点上（冬至日前后）时，地球公转所扫过的扇形角度达到最大值 61 分／日；而当地球距离太阳最远，即在远日点上（夏至日前后）时，地球公转所扫过的扇形角度达到最小值 57 分／日。扇形角度越大，意味着在地球相对于自身对称轴保持静止的情况下，地面上所观察到的太阳反向移动（称为太阳的视运动）的角度就越大。

事实上，地球围绕自身对称轴在一刻不停地转动着。这种自转运动也能造成太阳的一种反向运动。因此，通常所观察到的是太阳的上述两种反向运动相互叠加以后所呈现出来的结果。由于地球自转和公转的方向都是从西向东，因此太阳的两种视运动在方向上正好相反。在此情况下，由公转造成的太阳视运动角度越大，需要通过自转加以弥补的角度就越大，所耗费的时间也就越多，从而造成“太阳日”长度的加长。如此说来，冬至日前后的“太阳日”最长，夏至日前后的最短。长、短之间相差了大约 8 秒钟。

其次，由于太阳视运动所在的黄道与地球自转所形成的赤道之间存在着一定的夹角，导致“太阳日”在春分点和秋分点前后变短，在夏至日和冬至日前后变长，长、短之间相差了大约 21 秒钟。

进一步，由于近日点、远日点、中日点都在二至点和二分点之后的十多日，因此日、地间的距离在秋分点比在春分点要来得更远一些，从而导致秋分点上的“太阳日”比春分点上的来得更短一些。

将上述几种效应叠加起来，所得出的最终结果是：一年中，9 月 16 日正午至 9 月 17 日正午所间隔的时间最短，只有 23 小时 59 分 39 秒；12 月 23 日正午至 12 月 24 日正午所间隔的时间最长，达到了 24 小时 0 分 30 秒。正所谓“冬至长、秋分短”。

从以上介绍中不难看出，法国科学院在定义“秒”时，笼统地使用“太阳日”一词是不妥当的，需要加以补充完善。

2.3　世界时、历书时和原子时

如前所述，采用长度变化不定的“太阳日”来定义秒是不合适的。那么问题该怎么解决呢？

为此，美国天文学家纽康(S. Newcomb)想出了一个很好的办法：引进一个假想的太阳。该太阳在天赤道上以匀速的方式运转着，其速度等于真太阳在黄赤道上运行速度的平均值。这个假想的太阳就称为“平太阳”。平太阳连续两次上中天的时间间隔称为一个“平太阳日”。这个办法实际上是给真太阳日长度的平均值起了个名字，叫做平太阳日而已。描述平太阳瞬时位置的赤经用一个约定的公式来表示：

$$a_{\odot}=18^{h}38^{m}45^{s}.836+8640184^{s}.542T+0^{s}.0929T^{2}$$

其中 T 是从 1900 年 1 月 0 日 12 时起算的儒略世纪数(1 儒略世纪等于 36 525 个平太阳日)。

1“平太阳日”等于 24“平太阳时”，1“平太阳时”等于 60“平太阳分”，1“平太阳分”又等于 60“平太阳秒”。在日常生活中，“平太阳时”“平太阳分”和“平太阳秒”分别被简化成了“小时”“分钟”和“秒”。由此看来，倘若将 1820 年法国科学院所作出的规定修改为

1 秒等于平太阳日长度的 1/86 400

就合理了。

由“平太阳时”“平太阳分”和“平太阳秒”组成的“平时”系统中，平太阳处于下中天的瞬间(即平子夜)为每个平太阳日的起始时刻，称为零时。显然，这是一个与地理位置密不可分的时间概念。为了在全世界范围内建立起一个便于人际间交往的计时系统，人们又引入了世界时的概念，结合着时区的划分来使用。

所谓世界时，其实就是英国格林尼治天文台的地方平太阳时，简称 UT。其可划分为三个层次——UT_0、UT_1 和 UT_2，其中 UT_0 所涉及的计算公式为

$$UT_0=ST-a_{\odot}-\lambda+12^{h}$$

其中的 ST 是通过观测恒星所得出的时间，简称为恒星时；λ 为观测地点的经度（东经）采用值。身处不同地点的观测者在同一瞬间求得的 UT_0 略有不同。倘若在其中引入由极移造成的经度变化改正 $\Delta\lambda$，就能够得到全球统一的世界时 UT_1。相关公式为

$$UT_1 = UT_0 + \Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = (x\sin\lambda - y\cos\lambda)\tan\varphi$$

其中的 x、y 是瞬间地极坐标，φ 为观测地点的地理纬度。

UT_1 是全世界民用时的基础，同时还能够表示出地球瞬时自转轴的自转角度，因而是研究地球自转运动的一个基本参量。倘若在 UT_1 中加入由地球自转速度季节性变化所引起的改正 ΔTS，便可以得到一年内平滑的世界时 UT_2：

$$UT_2 = UT_1 + \Delta TS$$

$$\Delta TS = 0^s.022\sin2\pi t - 0^s.012\cos2\pi t - 0^s.006\sin4\pi t + 0^s.007\cos4\pi t$$

其中 t 以年为单位，从贝塞耳岁首起算（所谓贝塞耳岁首，是指加上了光行差所造成的影响后，平太阳的赤经等于 280 度的瞬间）。上述公式于 1962 年正式启用。出现在公式中的 $\Delta\lambda$ 和 ΔTS 的数值由国际时间局（BIH）负责计算并通报给世界各国。1970 年国际时间局根据 1967 年至 1969 年间全世界的观测资料，确定出了地球自转短期变化改正的数值，并于 1972 年起正式采用。

从上述几个公式不难看出，世界时系统是比较复杂的。那么，能否建立起一套相对简单的计时系统呢？

所谓简单，就是要求在该系统中时间的流逝比较平稳。经过长期观测，人们发现地球的公转运动相当稳定，符合人们的期望。实际上，早在 1952 年，就有人在考虑可否建立一个以地球公转为基础的计时系统的问题。

最终在 1958 年，国际天文学联合会作出决定：自 1960 年起，用历书时代替世界时作为时间计量的基本系统，世界各国天文年历的太阳、月球、行星历表等均以历书时为准进行推算。所谓历书时，就是以地球公转运动为基础的计时体系，简称 ET。

本来，除地球外，位于太阳系中的其他天体，其公转运动也都可以用来标定历书时。但是由于纽康在十九世纪末根据地球围绕太阳公转所编制的太阳历表，直到二十世纪六十年代仍然是最基本的太阳历表，因此人们还是选择地球的公转运动作为建立历书时的基础，同时将历书时的起点选择在纽康计算太阳几何平黄经的起始历元，即选取 1900 年初太阳几何平黄经为 279°41′48.04″的瞬间作为历书时 1900 年 1 月 0 日 12 时整。历书时中的秒长则被规定成：

1 秒等于 1900 年 1 月 0 日 12 时正回归年长度的 1/31 556 925.974 7。

简称历书秒。1960 年 10 月召开的第十一届国际计量大会接受了国际天文联合会作出的关于时间计量的有关规定。

然而，历书时的实际运作情况却大大出乎人们的意料。由于太阳的视运动比较缓慢，并且其中心位置难以界定，因此在实际工作中，人们选择了月球而非太阳作为观测对象来推算历书时。这样做又带来另外一个问题：由于月球视圆面的边缘并不规整，对其中心的确定同样带有一定的误差。其结果是，通过观测月球所推算出来的历书时的精度竟然比先前使用的世界时还要低，从而摧毁了人们先前对历书时的期望。另外，推算历书时需要进行较长时间的天文观测和数学归算，这在实际工作中也是个不容忽视的问题。于是乎，在仅仅使用了 7 年之后，历书时就被废止了，取而代之的是一种更加精确的计时系统——原子时。

所谓原子时，简单地说，就是立足于原子的某种特性而建立起来的计时系统。它的由来，可以追溯到十九世纪中后期。那时人们就发现了每一种原子都能够发射出一系列频率相当稳定的电磁辐射。但是，对于这一物理现象的理解却一直拖延到了二十世纪初。1913 年，丹麦物理学家玻尔提出氢原子结构理论。该理论指出，当原子中的电子从能量较高的能级向较低能级跳跃时，能够释放出与两个能级能量差相对应的电磁辐射。后来发展起来的量子力学证实了玻尔的这一论断，并让人们对原子辐射现象有着更多、更为深入的理解。

利用原子辐射现象制造出高精度时钟的设想，最先由美国物理学

家拉比提出，时间是在第二次世界大战之前。该设想在原理方面并不复杂：令一束原子穿过一个交变电磁场，当电磁场的交变频率与原子的某种精细跃迁频率相吻合时，穿过电磁场的原子便能够从电磁场中吸取能量而发生跃迁。如果将原子束的跃迁情况通过某种方式反馈到交变电磁场的发生器中，令发生器发出的交变频率能够根据原子束的跃迁情况进行自动调整，并最终使得跃迁原子的相对数目达到一个最大值，那么与这一最大值相对应的交变频率便是原子精细跃迁所具有的频率。将该频率进行分频、计数和译码处理后，便可以通过数显的方式来计量时间。1949 年，拉比的学生拉姆齐进一步指出，倘若令跃迁原子往返两次穿过交变电磁场，原则上可以让时钟的走时变得更为精准。

第二次世界大战结束后，美国国家标准技术研究院与英国国家物理实验室均宣布，将以原子共振为基础来建立时间标准，即两家机构均开始着手原子时钟的建造工作。结果，美国国家标准技术研究院的埃森和帕里率先完成任务，他们所建造的原子钟结构复杂，占地面积达到了一个房间的大小。随后由另一名科学家扎卡来亚斯与麻省的摩尔登公司合作，制造出了便携式商用原子钟，从而将时间的计量带入了原子时代。

在对原子钟的运行情况进行了一段时间的考察之后，国际计量学界决定再次修改秒的定义，最终形成了 1967 年第十三届国际计量大会所通过的如下决议：

> 1 秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁辐射的 9 192 631 770 个周期所持续的时间。

之所以要规定这么多个周期，即把铯-133 原子的振荡积累这么多次，目的是让秒的新长度尽可能接近原有长度。

利用铯-133 原子的振荡频率进行计时的装置称为铯原子钟。在使用铯原子钟时，应该考虑到温度效应，因为温度对于铯原子的运动状态有着直接的影响，进而影响到原子发生跃迁时所产生的频率。鉴于此，国际计量局于 1997 年对秒的上述定义进行了完善，规定相关定义中的铯-133 原子应处于温度为 0 K 下的静止状态。

2.4 相关链接——现代钟表与协调世界时

在人们的日常生活中，接触最多的计时工具主要是各种形式的钟表。这其中，又以石英钟和石英表最为常见。

石英钟、表的核心部件是石英振荡器，其工作原理与石英晶体所表现出的一种物理效应密切相关。人们很早就发现，倘若在石英晶体的某个轴向上施以机械压力，便会在晶体内部产生出一定数量的电偶极子。表面上看，这些电偶极子分布在受压面的左右两端，因而能够给出一定大小的电压，这一实验现象称为压电效应。与此同时，还存在着逆压电效应，即施加上一定大小的电压后，石英晶体反过来会产生某种程度的形变。

石英振荡器的设计利用了逆压电效应。通过施加交变电场的方法，让石英晶体发生周期性形变，从而产生周期性振荡现象。一旦振荡频率恰好等于石英晶体的固有频率时，便会出现简谐振动。研究表明，石英晶体的固有频率十分稳定，而且维持简谐振动所耗费的能量极低。这些优点再加上石英本身所具有的机械和化学稳定性，使得石英振荡器从二十世纪四十年代起，就成为了石英钟、电子表、电话、电视、计算机和数字电路中不可或缺的频率元件。

就整座石英钟而言，其设计原理是：由石英振荡器给出的谐振频率，经过分频后用于控制微型马达的运转，继而带动时针均匀走动。由此不难看出，石英钟的走时精度将完全取决于所选用的石英晶体品质的好坏。使用品质优良的石英晶体所制造出来的石英钟，1 天的走时误差仅为十万分之一秒，相当于连续运转 270 年后才积累出 1 秒钟的误差。但是，如果使用了品质较差的石英晶体，那么 1 天的走时误差就能够达到 1 秒钟。

正是这个原因，人们随后又发明了无线控制计时钟表（radio controlled timepieces），简称电波钟。这款钟的工作原理是：国家授时中心将标准时间进行编码，然后采取低频（20～80 kHz）载波方式将编码信息通过无线电长波发播出去，通过此方式形成的信号称为低频无线电时码信号。电波钟通过内置的微型无线电接收系统接收到该信号

后，通过集成芯片对信号加以解调，最后再利用解调得到的输出控制钟表的走时。从这一简单介绍中不难看出，原则上讲，所有电波钟所显示的时间都与国家授时中心所保有的标准时间同步，从而保证了计时的准确性。

那么，国家授时中心所保有的标准时间又是从何而来呢？

关于这个问题的答案涉及了前面所介绍的原子钟。由原子钟给出的时间又称为原子时，这是相对于此前的世界时和历书时均来自天文观测而言的。根据1967年召开的第十三届国际计量大会所通过的有关决议，在指定了零时刻的情况下，原子钟连续而均匀的走动便能够提供一个连续而稳定的时标，如同持续而稳定的地球运动能用于公元纪年一样。零时刻被指定为世界时(UT)1958年1月1日0时0分0秒瞬间的原子时称为国际原子时，简称TAI。

由于种种人们尚不清楚，或者清楚了但目前尚无法处理的一些因素的影响，单台原子钟的稳定性并非绝对可靠。因此较为普遍的做法是同时启用多台原子钟，将其走时结果的平均值作为原子时的准确时间。该时间经过了时区矫正之后，便给出了国际原子时。

近年来出现了一种新型的计时装置——原子喷泉钟。其精度，以铯原子喷泉钟为例，可以达到10^{-15}量级，比多台铯原子钟联用所能达到的精确度还要高出两个数量级。铯原子喷泉钟的设计原理是：将铯原子组成的气体导入时钟的真空室里，令6束相互垂直的红外激光（黄线）照射该气体，致使各个原子彼此靠近，最终形成一个球状物。在这一过程中，铯原子的运动速度被逐步减慢，温度逐步降低，直至接近绝对零度。如此一来，各原子在状态上逐步趋同，最终导致反馈系统给出极其敏锐的微波共振频率。而频率的窄化将显著改善时间计量的精准度。在激光与铯原子的相互作用中，位于垂直方向上的两束激光相互合作，将铯原子气球向上托举，形成喷泉式运动，故被命名为铯原子喷泉钟。喷泉钟的使用，大幅提升了国家授时中心所保有时间的稳定性、准确性。

最后来谈谈协调世界时。

如前所述，国家授时中心所保有的时间由铯原子钟或铯原子喷泉

钟提供,其中的秒长恒定不变。而根据地球运动得出的世界时则不同,其秒长会随着地球运动状况的改变而改变,无法维持在某个特定数值之上。因此,即便经过一段不算长的时间,原子时与世界时在时刻表示上都会出现一个小小的偏差。该偏差若不及时加以处理,久而久之难免演变成一个可观的数值。届时将会出现时钟运行到了中午 12 点整,可是太阳才刚刚升起的奇怪现象。

为此,于 1971 年召开的第十四届国际计量大会决定,当世界时与原子时的时刻之差超过了 0.9 秒时,便在原子时上增加或减少 1 秒,使得面向公众的计时系统所给出的时刻显示尽可能接近世界时系统。这种处理等价于在平年系统中设置闰年,只不过被置闰的是"秒"而非闰年里的"天"而已。经过置闰处理的原子时就称为协调世界时。

在什么年份设置闰秒,以及设置正闰秒(将原子时调慢 1 秒钟)还是负闰秒(将原子时调快 1 秒钟),这项工作由地球自转参数服务局和国际计量局具体负责。一旦作出了置闰决定,相关机构会提前通知各国负责管理时间计量工作的部门,再由该部门公告全国。闰秒的植入一般安排在年中或年末的最后时刻进行,即 6 月 30 日或 12 月 31 日的最后一秒钟。

具体的置闰方法是:如果设置正闰秒,则将当天时刻 23:59:59 的下一时刻记为 23:59:60,然后才是第二天的零时 00:00:00;如果设置负闰秒,则将当天时刻 23:59:58 的下一时刻跳记为第二天的零时 00:00:00。在我国,由于使用的是北京时间,因此置闰操作被安排在指定年份的 1 月 1 日或 7 月 1 日早晨的 7 点 59 分 59 秒进行,具体方法是:

正闰秒:07:59:59 → 07:59:60 → 08:00:00;

负闰秒:07:59:58 → 08:00:00

自 1971 年至今,累计置闰 25 次,并且每次设置的都是正闰秒,表明地球的自转速度总体上呈现出一种逐渐减缓的趋势。

第3章 米与光速

3.1 曾经的米尺

如第1章所述，早在1793年，应大革命政府的要求，法国科学院计量委员会对于预期中的“米”所具有的长度就计算出了一个大致的数值。1793年8月1日，国民议会将该数值规定为“临时米”，并通过铸造大量铜尺的办法加以宣传推广。

1799年的2—3月间，负责测量法国敦刻尔克海口至西班牙巴塞罗一线子午弧长度的德拉布里和麦卡恩向一个由多国学者组成的国际委员会正式提交了他们的测量结果。该委员会经过认真研究，决定将1米的长度规定为法国巴黎当时使用的长度单位“分”的443.296倍。1799年6月，表示1米长度的新米尺打造完毕，史称“档案米”。

作为具有最高权威的基准器具，“档案米”经常被用来检定其他工作米尺的准确性。久而久之，其两端出现了轻微的磨损。针对这一情况，1872年，当人们着手打造一批新米尺时，决定采用两条平行刻线之间的距离来表示米的长度。人们习惯上将这种形制的米尺称为米原器。

然而，通过长期的观察研究，人们发现新型米原器仍然存在着一些问题。

首先，由于1米所具有的长度是通过刻划在米原器上的两条平行线段之间的距离表示出来的，因此在高精度比对中，这两条平行线段被自然而然地放大到了一定的倍数，进而展现出不容忽视的宽度。既有了宽度，便少不了边缘，而边缘线的平整与否会给比对结果带来一定的影响。

其次，由于地球引力的缘故，米原器刻线所在的水平部分会受到一个持续指向地面的重力作用。久而久之，该平面必定会发生一定程度的向下弯曲，进而导致表示米长度的两条平行线段之间的真实距离

发生轻微改变。至于变化的幅度，将随着米原器所处地理位置的不同以及存放时间的长短而变化。

最后，凡是固体物质，均具有一定的微结构。这句话包含着两层意思：第一，从点阵结构上看，可能存在着多种晶格缺陷；第二，从化学组成上看，从内到外可能存在着细微的差别。因此从原则上讲，随着放置时间的延长或者所处环境的改变，米原器的微结构极有可能发生某种程度的变化，进而影响到其表示的长度。

在上述因素中，只有刻线边缘的平整性可进行人工修饰，余下的就非人力所能为。这意味着在不远的将来，人们很可能会受困于米原器的长期稳定性。因此着眼于未来，有必要对长度基准进行重新定义。

3.2　伟大的思想

1870 年，英国物理学家麦克斯韦就计量标准问题发表了如下评论：

> 虽然地球的尺寸和它的自转时间相对于我们现有的比较方法而言是非常持久的，但是终非亘古不变。地球有可能由于变冷而缩小，或者由于陨石的坠落而加大，其自转速度也许会一点点地变慢。然而，它依旧是颗行星，还像从前那样继续运转着(因而令我们无法感受到它所发生的变化)。
>
> 但是分子则不同。譬如说氢分子，如果它的质量或是它的振动频率发生改变的话，就不再是一个氢分子了。
>
> 因此，如果我们希望获得绝对永久的长度、时间和质量标准的话，就不应该在我们行星的大小、运动或质量上去寻找，而应该在不朽的、不可改变的以及完全相同的分子所拥有的波长、振动周期和绝对质量上去尝试。

基于在以上评论中所表达出来的思想，早在 1859 年，麦克斯韦就建议人们选择钠元素发出的黄色谱线的波长作为长度的自然基准。不过令人遗憾的是，经过细致观察，人们发现钠元素的黄色谱线其实包含着两种辐射(其波长间隔约为平均波长的千分之一)，不能用于长

度基准的定义。于是人们便将注意力转移到汞元素所发出的绿色谱线上。但是很快就发现,该谱线其实非常复杂,同样无法满足定义长度基准的要求。

直到1890年,意欲通过光的干涉效应测量出地球自身运动速度的美国物理学家迈克尔逊发现,镉元素发出的红色谱线不仅清晰度高,而且重现性好。1892—1893年间,迈克尔逊与法国物理学家贝努瓦合作,在国际计量局运用一台采用特殊工艺制造出来的干涉仪,比照着“国际米”对上述红光进行了精确测长。在15℃的干燥空气中,该波长为

$$\lambda_{Cd}=6\ 438.469\ 6\times10^{-10}\text{米}$$

这一数值与1906年运用新方法所取得的结果相吻合,而且在后来的反复测试中得到了进一步的确认。最终在1927年,达成了如下国际协议:

自然镉元素所发射的红线波长为6 438.469 6Å。

该协议初步实现了麦克斯韦当年的设想。

然而好景不长,物理学家皮拉德针对元素辐射本身所具有的特性展开过全面细致的调查,结果发现有两种因素能够较为明显地影响到辐射谱线的波长:第一个因素是同位素。不同种类的同位素原子,由于其原子核的不同,所辐射出来的谱线在精细结构上存在着细微的差异。如此一来,不同来源的样品,往往会因为其含有的各种同位素原子比例的不同而发射出不尽相同的谱线。这就意味着,若想通过特定谱线的波长来定义长度的基本单位,就必须使用只含有单一同位素原子的样品。与此同时,考虑到谱线的精细结构与原子核的磁性之间有着密切的联系,被选取的同位素原子还应该拥有偶数个质子和偶数个中子。第二个因素是热运动。在外部观察者看来,当原子朝向自己运动时,所发射谱线的波长会缩短;反之便会加长。由于微观粒子的热运动在本性上是完全无规则的,因此实际观测到的各种物质谱线均表现出了一定的展宽。至于展宽的程度,则随着运动无规则性的加剧而加深。在外部条件保持不变的情况下,无规则运动的剧烈程度与微观粒子所具有的质量成反比。因此,质量越小的原子,其辐射的谱线越

宽。由此看来，在选择同位素原子时不仅要满足前面提出的条件，而且应该考虑到原子所拥有的质量。

进入二十世纪五十年代以后，人们逐步掌握了同位素分离技术，因而有能力制备出只含有单种同位素原子的样品。在此基础上，通过大量而深入的研究，人们发现氪-86 原子所发射的橙色谱线优越于镉原子所发射的红色谱线。最终，于 1960 年 10 月召开的第十一届国际计量大会决定，将长度单位米的定义修改为：

1 米等于氪-86 原子在 2p 与 5d 能级之间跃迁时所产生的辐射在真空中波长的 1 650 763.73 倍。

按照上述规定，原则上讲，在全世界的任何地方均可以开展“米”的复现工作而无需溯源到国际米原器，而且还能够保证米的量值在全球范围内的统一。

不过，随着科学技术的发展进步，上述定义逐步暴露出一些问题。譬如，原子谱线通常是由光谱灯发射出来的，涉及为数众多的原子。而原子数目的增多，会带来一些附加效应。其中，比较主要的有辐射原子之间相互作用所引起的压力效应以及原子的热骚动或因激励电流的卷吸而引起的多普勒效应。研究表明，虽然氪-86 光谱灯在所推荐的条件下使用时，引起的不同微观效应之间能够相互抵消一部分，并且压力和电流对于谱线的影响程度还可以通过将有关结果外推至零压力和零电流而计算出来，但是由不同研究机构针对稳定性和复现性都明显占优的激光所开展的研究表明，氪-86光谱灯所提供的关于米的定义精度只能达到 2×10^{-9} 量级，再高就不可能了。

10^{-9} 量级，对于现实生活中可能涉及的测量任务而言，不仅足够，而且绰绰有余。但在个别领域，随着研究的深入，上述精度水平逐渐演变成了一个制约性因素。在此情况下，关于长度基准的定义必须作进一步的修改，以便满足科技发展的新需要。

3.3　世代相传的努力

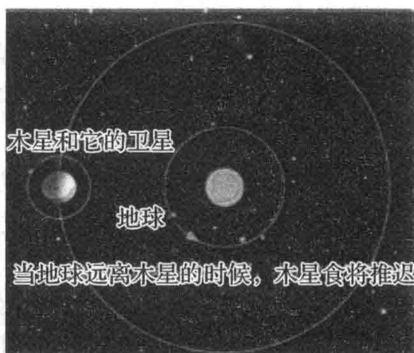
如何进一步提升长度基准的定义精度问题，最终通过对光速的精准测量而得到圆满解决。

说到光速，自然就产生了一个问题：光有速度吗？

在距今不算遥远的过往，这是一个除极少数人之外不可能思考的问题。

最先认识到光有速度的人，是丹麦的天文学家罗默（Ole Christensen Rømer）。1676 年，罗默在观察木星所带的卫星木卫一在其圆面上的投影时，发现该投影连续两次出现所间隔的时间呈现出一种周期性的变化规律。从最短的 42.5 小时算起，间隔时间首先是慢慢延长，然后就逐步缩短，直到重回 42.5 小时这一数值。

对于以上观测结果，罗默给出的解释是：在周期性变化的前半程，地球朝着远离木星的方向运动，使得在投影出现前的瞬间由木星发射出来的光线在到达地球的过程中，比前一次光线多行进了一段距离，从而导致前后两次投影所间隔的时间加长。在周期性变化的后半程，情况正好相反。地球朝着不断接近木星的方向运动，致使第二次光线比起前次光线少行进了一段距离，从而导致两次投影所间隔的时间缩短。实测结果是，最长的间隔时间与最短的相比，大约多出了 22 分钟。倘若简单地认为间隔时间的长短直接对应着地球距离木星的远近的话，那么很容易得出 22 分钟的时间差就是光线横穿地球公转轨道所耗费的时间这一结论。由于地球公转轨道的大小是一个有限的数值，由此不难看出光线是以有限速度进行传播的。



在罗默所处的那个年代，人们已经知晓地球的公转半径约为 1 亿 4 000 万千米。由此不难计算出光的行进速度大约是 21 万千米每秒。这一结果最早由荷兰籍物理学兼数学家惠更斯正式给出。

光速测量史上的下一项纪录是由英国天文学家詹姆斯·布拉德雷（James Bradley）提供的。1725—1728 年间，布拉德雷在对恒星进

行天文观测时发现，倘若基于地球的公转轨道建立起一个三维坐标系，则恒星在其中所处的位置将明显不同于人们在地面上所观察到的位置。产生这一差异的原因是恒星所发出的光线在传播到地球表面的过程中需要耗费一定的时间，而在这段时间内，地球所处的位置因为公转的缘故发生了明显的改变。因此，根据所观测到的恒星位置的变动情况(称为光行差)也可以计算出光的传播速度。这类计算所给出的一个代表性结果为

$$C=2.9993\times10^{8}\text{ 米/秒}$$

无论是先前的21万千米每秒还是上述数值，都清楚地表明光的行进速度远远超过了人们在日常生活中可能接触到的各种运动速度(包括音速)。这就意味着即便是穿越长达几十乃至上百千米的距离，光所耗费的时间也微乎其微。这也是为什么人们通常感觉不到光有速度的原因。与此同时，每秒高达几十万千米的速度也意味着要对光速进行人为测量不是一件容易的事情，必须具备准确测量仅有百万分之一秒这种时间间隔的能力。

到了十九世纪中期，因为其他方面的原因人们发明出了高速齿轮。这一装置的问世使得对于极短暂时间间隔的探测成为了可能，进而勾起了人们通过实验测量出光速的愿望。实验原理并不复杂：令一束光线穿过齿轮的某个齿缝，垂直到达安放在齿轮后面的反射镜后再反射回来。被反射回来的光线能否再次穿过齿轮，将取决于齿轮的运动状况。在齿轮保持静止的情况下，无疑是可以的；当齿轮旋转起来后，情况就变得不确定。当转速较低时，由于轮齿的阻挡，反射光线不可能穿越齿轮；只有当转速提升到某个数值，使得光线往返于齿轮与反射镜之间所耗费的时间与齿轮转动一个轮齿所花费的时间正好相等时，反射光线才能够再次穿过齿轮而被观测到。这样一来，根据一个轮齿所占据的角度以及齿轮的转速，便可以计算出转动一个轮齿所经历的时间。用该时间除光线在往返行程中所走过的路程，便能够得出光的行进速度。测量光速的上述方法被称作旋转齿轮法。1849年，斐索(Armand Hippolyte Louis Fizeau)运用旋转齿轮法对光速进行了首次人为测量，所得结果为

$$C=3.153\times10^{8}\text{ 米/秒}$$

1862 年，傅科(Léon Foucault)采用原理与旋转齿轮法大同小异的旋转镜法测量光速，结果得到了

$$C=2.98\times10^{8}\text{ 米/秒}$$

在十多年后的 1874 年，考尔纽(M. A. Cornu)对旋转齿轮法进行了一次改进，并因此而得到

$$C=2.999\ 9\times10^{8}\text{ 米/秒}$$

时间又过了五年。1879 年，迈克尔逊(Albert Abrahan Michelson)对旋转镜法进行了改进，并取得了如下结果：

$$C=(2.999\ 10\pm0.000\ 50)\times10^{8}\text{ 米/秒}$$

上述数值没有考虑到空气折射率对光速所造成的影响。倘若将该影响考虑进去，其结果为

$$C=(2.998\ 53\pm0.000\ 60)\times10^{8}\text{ 米/秒}$$

再后来，迈克尔逊综合运用旋转镜法与旋转齿轮法的优点，发明了旋转棱镜法。在 1924—1927 年间，迈克尔逊运用该方法对光速进行了反复测量，最终得到

$$C=(2.997\ 96\pm0.000\ 04)\times10^{8}\text{ 米/秒}$$

数据公布之后，人们发现其中存在着偏差。原因是迈克尔逊由测量结果推算真空中的光速时，采用了空气的相速折射率而非正确的群速折射率。这一错误在 1929 年得到更正。更正后的数值为

$$C=(2.997\ 98\pm0.000\ 04)\times10^{8}\text{ 米/秒}$$

这一结果很快就得到了世人的公认。

无论是最早出现的旋转齿轮法，还是后来发展起来的旋转镜法和旋转棱镜法，均要求测试光线行进一段较长的距离。如斐索的测量是在相距 8 633 米的苏冷与达蒙玛特勒之间进行的，而迈克尔逊则选择了相距 35 373.21 米的两个山峰来开展工作。敞开的环境会给实验结

果带来诸多的不确定性因素，于是人们开始思考能否在测试条件能够进行人为控制的室内开展光速的测量工作。

在这方面，埃森(Essen)率先进行了尝试。他将微波输入到圆柱形的谐振腔中，当微波波长与谐振腔的几何尺寸相匹配时，谐振腔的横截面周长 πD 与微波波长 λ 之间有着简单的算术关系：

$$\pi D=2.404\ 825\lambda$$

因此，只要测量出谐振腔的直径，便可以计算出微波的波长。至于直径的测量，则可以通过干涉法来完成。另一方面，采取逐级差频的办法可以精确测量出与腔体发生共振时的微波频率。有了波长与频率之后，将二者简单地相乘便可以得出光速的数值。由于在实验过程中运用到了谐振腔，因此测量光速的这种方法又被称作谐振腔法。1950年，埃森和戈登·史密斯采用谐振腔法得到了如下结果：

$$C=(2.997\ 925\pm 0.000\ 030)\times 10^{8}\text{ 米/秒}$$

其有效数字达到了创纪录的7位。

随后，英国实验物理学家K. D. 费罗姆(K. D. Froome)也开展了类似的工作，并于1958年向外界公布了其测量结果：

$$C=(2.997\ 925\ 0\pm 0.000\ 001\ 0)\times 10^{8}\text{ 米/秒}$$

这项结果将光速值所包含的有效数字进一步提升到了8位。

进一步的测量结果来自激光。众所周知，激光具有方向性强、单色性好的特点。因此，激光即便行进了几千米远的距离，也能够给出具有完善衬比的干涉效果。但是，由早期激光器产生的光线并不理想，即便经过了一系列的改进，所辐出激光的稳定性也只能达到 10^{-8} 量级。后来人们发明了能够锁定饱和吸收谱线的激光器，使得激光的稳定性达到了空前的 10^{-11} 量级，从而为测量出更为准确的光速值打下了坚实的基础。

1972年，美国国家标准技术研究院的一个研究小组利用稳频He-Ne激光器测量出光在真空中的传播速度为

$$C=(299\ 792\ 456.2\pm 1.1)\text{米/秒}$$

与此前的数据相比，在精度上提高了约 100 倍。在随后的 1974 年，另一位物理学家布兰尼利用稳频 CO_2 激光器得到了如下结果：

$$C=(299\ 792\ 459.0\pm0.6)\text{米/秒}$$

此时，数据的不确定度主要来自米定义本身。

针对这一情况，1975 年，第十五届国际计量大会将真空中的光速值推荐为

$$C=299\ 792\ 458\ \text{米/秒}$$

次年，上述数值便得到了伍兹等人公布的最新测量结果

$$C=(299\ 792\ 458.8\pm0.2)\text{米/秒}$$

的支持。鉴于此，于 1983 年召开的第十七届国际计量大会决定，将真空中的光速约定为

$$C=299\ 792\ 458\ \text{米/秒}$$

所谓约定，就是将 299 792 458 作为一个无误差的绝对精确的数字看待。其背后的意思是，那些对于光在真空中的传播速度能够产生影响的因素统一成为真空的某个组成部分，这样就从根本上保证了真空中的光速值不再是一个可进行实验测量的物理量。

约定了光在真空中的传播速度之后，长度的基本单位“米”看起来似乎变成了一个导出量：

> 1 米是真空中光在 1/299 792 458 秒的时间间隔内行进的距离。

根据上述规定，事关长度测量的精度就归结于时间的计量精度。而从目前的情况看，该精度能够达到 10^{-15} 量级。

3.4 启迪

前面“秒的产生与演变”一章指出，远洋航行对于精确定位的需求催生了时间单位“秒”。此后，在不断追求对于“秒”的精准测量过程中，人们最终将秒的时长与铯-133 原子的自然属性关联上了，自觉不

自觉地让麦克斯韦提出的关于如何选取计量基准的构想，首次在时间上变为了现实。

从本章的有关介绍中不难看到，通过对光速测量精度的不断追求，人们最终将长度单位米与真空中的光速值关联了起来，进而在长度方面也实现了麦克斯韦的构想。

上述两项成就意义非凡。

为了体会这一点，不妨回顾一下于 1921 年 10 月召开的第六届国际计量大会所通过的有关决议：

（1）国际标准原器及其参考基准存放于国际计量局，只有国际计量委员会的委员才有权进入存放地点；

（2）国际计量局局长必须根据国际计量委员会的有关决议，并在至少有一名委员在场的情况下，方可进入国际计量原器的存放地；

（3）国际计量原器的存放处必须同时使用三把钥匙才能开启。这三把钥匙分别交由法国档案库主任、国际计量委员会主席以及国际计量局局长保管。

作出以上规定的目的，无外乎保证国际标准原器的安全性。即便如此，国际标准原器依然面临着诸多安全风险。譬如，原器存放地万一发生了地震、洪水或火灾等自然灾害，抑或爆发了局部战争等人为灾祸时该怎么办？仅凭这一点便不难看出，若想从根本上消除计量基准被丢失或者惨遭损毁的危险，最好的办法就是像麦克斯韦所倡导的那样，将基本单位定义在某种自然之物而非特定的人造之物上。

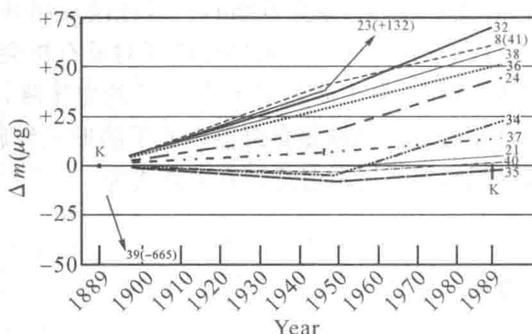
由此很容易联想到质量单位。至今仍然以实物作为定义基准的千克，是否应该考虑采取其他方式进行重新定义呢？这便是时间和长度单位带给人们的启发。

第4章　千克的再定义

4.1　变化着的千克原器

本书在第1章中曾指出，截止到1889年第一届国际计量大会召开之际，国际计量委员会分前后两批一共制作出了43件千克砝码。这些砝码被一一编号为KⅠ、KⅡ、KⅢ、No. 1、No. 2、No. 3等等。其中KⅢ被选为基准原器，称作“国际千克”；KⅠ和No. 1被选为“国际千克”的两个作证原器，并按照“国际千克”的条件予以保存；No. 9和No. 31交给国际计量局作为工作原器使用；No. 7、No. 8、No. 29和No. 32留作备用；其余34件砝码通过抽签的办法分发给《米制公约》的签约国，作为这些国家的质量基准使用。到了二十世纪八十年代，时间过去了一百年，这些基准物的现时状况究竟如何呢？

为此，于1987年10月召开的第十八届国际计量大会决定对各国家的千克原器展开一次检定。1989年，在国际计量局的统一安排下，世界各国陆续将其持有的千克基准与“国际千克”进行了比对，结果发现各国家基准的质量年均增长0.5 μg。其中最值得一提的是由法国科学院保存的编号为No. 34的原器。该原器先后与“国际千克”进行过三次比对：第一次是在1889年，量值为1 kg－0.073 mg；第二次在1950年，量值为1 kg－0.078 mg；第三次在1992年，量值为1 kg－0.051 mg。在第二次比对完成之后，这件原器就一直保存在密闭容器中，从未动用过。虽说如此，但是经过了42年之后，其质量仍然增加了27 μg。



不同编号千克原器的质量随时间的变动情况

之所以给予法国的这件千克原器以特别的关注，是因为该原器所采取的保存条件与国际千克原器相当。既然如此，人们就有理由怀疑“国际千克”自身是否也发生了同等程度的改变。如果怀疑属实的话，这就意味着“国际千克”原器本身是不稳定的，而且其变化幅度超越了国际比对所能达到的不确定度。这样一来，就出现了类似于当年测定光速时所出现的测试精度超过了米定义自身精度的情形，有必要加以解决。

问题是如何来解决，能够采取类似于“米”的办法吗？

经过了一段时间的酝酿之后，于 1995 年 10 月召开的第二十届国际计量大会发出号召，希望国际上有条件、有能力的研究机构尽快开展废除千克实物基准的有关工作。为响应这一号召，各国的科研人员构思出了几种解决方案。其中最具吸引力的，是建立在瓦特天平之上的约定普朗克常数这一构想。

4.2　瓦特天平

所谓瓦特天平，实际上是一种将机械功率与电功率加以比较的装置，最早由英国国家物理研究所的 B. Kibble 构思出来。该装置的特别之处就在于综合运用了两项量子物理学成果——约瑟夫森效应和量子霍尔效应。

所谓约瑟夫森效应，是指 1962 年，年仅 25 岁的英国剑桥大学的博士生约瑟夫森所预言的物理现象：当两块超导体被一个极薄的绝缘

层隔开后(这种装置现称为约瑟夫森结),一旦在两块超导体上施以直流电压 U,那么存在于超导体当中的库珀电子对就有机会穿过居间的绝缘层。在穿越过程中,由于涉及了大小为 U 的电压降,因而出现了大小为 $2eU$ 的能量变化。该能量最终会以光子的形式释放出来,同时出现与电磁辐射同频率的振荡电流。有关公式为

$$2eU=hf$$

上式亦可表示成如下形式:

$$U=\frac{h}{2e}f$$

从中可以清楚地看出,作用于约瑟夫森结上的电压 U 正比于电磁辐射的频率。该比例系数为 $\frac{h}{2e}$,现称作约瑟夫森常数。由于该常数仅仅由数字 2 与两个基本物理常数 h、e 组成,因而具有确定的数值,就如同数学参量 π 有着唯一确定的数值一样。于是从理论上说,利用约瑟夫森效应可以建立起一种准确性堪比电磁频率的量子电压基准。

落实到实验上,就是使用频率介于 10 ～ 100 GHz 的电磁波照射约瑟夫森结,然后连续地改变施加在结上的电压,结果便会出现电流值在个别电压处发生突然跳跃的现象。其中,与第 n 次跳跃相对应的电压 U_n 同 n 以及电磁辐射频率 f 之间满足如下关系:

$$U_n=n\cdot\frac{h}{2e}\cdot f$$

显然,只要精确测量出照射在约瑟夫森结上的电磁波频率 f,同时又知道了约瑟夫森常数值,便可以得出 U_n 的精确结果。

至于量子霍尔效应,是指在低温和强磁场条件下,霍尔电压与磁场强度之间通常所表现出来的线性关系突然演变成了一条包含着一系列台阶的复杂曲线这一实验现象。各台阶处的电阻被称为霍尔电阻,可表示成

$$R_{\rm H}=\frac{h}{e^2 i}\qquad(i=1,2,3\cdots)$$

出现在上述公式中的基本常数组合$\frac{h}{e^2}$被称作冯·克利青常数，这是因为量子霍尔效应最先由德国物理学家冯·克利青于 1980 年从实验中观察到的。由于冯·克利青常数仅由两个基本物理常数 h 和 e 构成，因此利用量子霍尔效应可以建立起高度精确的电阻基准。事实上，于 1987 年 10 月召开的第十八届国际计量大会就作出决定，自 1990 年 1 月 1 日起，将电磁学单位建立在约瑟夫森效应和量子霍尔效应之上。

从目前的情况看，基于约瑟夫森效应所得出的电压基准，其精度能够达到 10^{-12} 量级；而基于量子霍尔效应所得出的电阻基准，其精度虽然稍差一些，但也达到了很高的水平。国际计量局曾经建立了一套可运输的量子化霍尔电阻装置，用于对各国家实验室所建立的电阻基准展开循环比对。结果发现，各国电阻基准之间的一致性达到了 10^{-9} 量级。

有了约瑟夫森效应和量子霍尔效应所建立起来的电压和电阻基准，开展机械功率与电功率之间的精确比对就变得不太困难了。有关原理及操作是：在精密比对天平的一端悬挂上一匝线圈，同时在垂直于线圈平面的方向上（即水平方向上）放置一个均匀磁场。当线圈中通入方向适当的电流后，磁场与电流之间所产生的相互作用导致线圈感受到了一个指向地面的作用力。调整电流的大小至一合适数值 I，令电磁力刚好与放置在天平的另一端、质量为 m 的砝码所产生的重力相平衡，则有如下等式：

$$mg = I\oint(\vec{B} \times d\vec{l})_z$$

其中$\vec{B}$代表磁场矢量，$d\vec{l}$代表线元矢量，×是矢量积符号，z 代表着线圈。

不过，由于出现在上述公式中的积分项难以进行直接处理，因此实验过程中还要开展另外一项工作：将装置中的电流切断，并驱使线圈以大小为 v 的速度向上运动。此时在线圈中会出现一个因切割磁力线而感应出来的电动势 E。E 与运动速度 v 之间满足如下定量关系：

$$E = v\oint(\vec{B} \times d\vec{l})_z$$

出现在上式中的积分正好是前一等式所包含的积分项。如此一来，可

以将前、后两个公式合二为一：

$$mgv=EI$$

借助约瑟夫森效应和量子霍尔效应，可以将上式中的乘积项 EI 表示成如下形式：

$$EI=\frac{E^2}{R}=\frac{U^2}{R_{\mathrm{H}}}=i\frac{f^2}{4}h \qquad (i=1,2,3\cdots)$$

进而可以将前述等式改写成

$$mgv=i\frac{f^2}{4}h \qquad (i=1,2,3\cdots)$$

其中 f 代表电磁辐射频率，可以精确到 10^{-15} 量级。因此，只要获得了高精度的重力加速度 g 和线圈移动速度 v，便可以得到高精度的普朗克常数 h 的值。目前，关于普朗克常数的测量都是基于瓦特天平法而进行的。

上述公式也可以反过来用。在确定了普朗克常数的情况下，只要获得了高精度的重力加速度 g 和线圈移动速度 v，便可以得出 m 的精确数值。这相当于以一种隐含的方式给出了质量基本单位千克的量值大小。如果人们愿意，也可以通过 m 进一步制作出质量精确等于 1 千克的标准砝码，以担当量值传递任务，进而在形式上实现千克的再定义。

以上所述便是借助瓦特天平，通过约定普朗克常数值的方法重新定义千克这一构想的主要内容。

4.3 谨慎的抉择

英国国家物理研究所(NPL)是世界上最早开展瓦特天平方面研究的机构。截止到 1998 年，其所得到的普朗克常数值为 $6.626\ 068\ 91\times10^{-34}$ 焦耳秒，相对不确定度为 8.7×10^{-8}，与“国际千克”原器可能具有的年漂移率处于同一个量级水平，从而为重新定义千克创造出良好条件。

于是，在 2004 年的年底，由国际单位制咨询委员会(CCU)主席 Mills、国际科学技术数据委员会(CODATA)主席 Mohr、国际计量局

(BIPM)前局长 Quinn、美国国家标准技术研究院(NIST)前电学处处长 Taylor 以及瓦特天平项目负责人 Williams 以“重新定义千克：是该作出决定的时候了”为题，共同建议：

(1) 将千克重新定义在普朗克常数或阿伏加德罗常数的基础之上，而不必等到更为理想的数据出现之后；

(2) 现有千克原器所具有的 10^{-7} 量级的不确定度对于绝大多数的应用而言并不造成实际影响，其质量可以作为约定值继续使用，以担当量值传递任务。

但是，对于重新定义千克工作所具有的紧迫性，也存在着不同的看法。例如，德国联邦物理技术研究院(PTB)的学者们就认为，目前千克原器所存在的问题其实没有人们想象的那么严重。言下之意，对于千克的再定义问题可以从长计议。

最终，系统地更改 SI 基本单位的定义所能带来的好处加快了有关工作的进程。所说的好处是，如果将千克定义在普朗克常数之上，同时约定基本电荷的数值，便可以将约瑟夫森常数 K_J 和冯·克利青常数 R_K 的数值给确定下来。相应地，由 K_J 和 R_K 导出的电压和电阻单位便自动落在了 SI 框架之内，从而在根本上解决了根据人为约定的 K_{J-90} 和 R_{K-90} 所确定出来的电压和电阻单位长期游离在 SI 框架之外的问题。于是，在 2005 年 10 月，国际计量委员会作出如下决议：

1. 原则上批准关于准备采用基本物理常数重新定义 SI 基本单位的建议。

2. 请各有关方面在 2007 年 6 月之前向国际计量委员会提交准备采用基本物理常数重新定义 SI 基本单位的具体建议。

3. 密切关注有关新定义的实验结果，尤其是那些运用不同方法所开展的实验。

4. 建议各国家计量实验室开展与新定义有关的基本物理常数的测定工作，以及有关实物基准稳定性的考察工作，为新定义的实施作准备。

上述决议正式拉开了采用基本物理常数重新定义 SI 基本单位这项工作的序幕。

第5章　国际单位制的改制

5.1　与改制相关的决议

2011年10月17日，令人瞩目的第24届国际计量大会在法国巴黎隆重召开。大会最终同意国际计量委员会针对国际单位制拟作出的如下修订：

国际单位制基本单位的定义由以下一些常量组成：

铯-133原子基态超精细跃迁的频率是9 192 631 770赫兹；

光在真空中的速度是299 792 458米每秒；

普朗克常数是6.626 06X$\times 10^{-34}$焦耳秒；

基本电荷是1.602 17X$\times 10^{-19}$库仑；

玻尔兹曼常数是1.380 6X$\times 10^{-23}$焦耳每开尔文；

阿伏加德罗常数是6.022 14X$\times 10^{23}$每摩尔；

540$\times 10^{12}$赫兹的单色光辐射的光强度等于683流明每瓦特。

其中X表示根据国际科学技术数据委员会(CODATA)发布的基本物理常数的最新推荐值所应该添加到h、e、k和N_A当中去的那部分数字。

上述修订一旦实现，涉及基本单位的一些决议将被废止。这些决议包括：

1. 自1889年(1889年第1届国际计量大会和1901年第3届国际计量大会)以来基于国际千克原器而对千克作出的定义将被废除。

2. 自1948年(1948年第9届国际计量大会)以来基于国际计量委员会的建议(1946年国际计量大会第2项决议)对安培作出的定义将被废除。

3. 为使用约瑟夫森效应和量子霍尔效应对伏特和欧姆进行复现，应大会(1987 年第 18 届国际计量大会第 6 号决议)请求，国际计量委员会(1988 年国际计量大会第 1 项和第 2 项建议)所通过的约瑟夫森常数和冯·克利青常数值将分别被废除。

4. 自 1967/1968 年(1967/1968 年第 13 届国际计量大会第 4 项决议)生效的基于更早更不明确定义(1954 年第 10 届国际计量大会第 3 项决议)的开尔文定义将被废除。

5. 自 1971 年(第 14 届国际计量大会第 3 项决议)生效的基于碳-12 元素的摩尔质量等于 0.012 千克每摩尔的定义将被废除。

6. 自第 17 届(1983 年第 1 项决议)、第 13 届(1967/1968 年第 1 项决议)和第 16 届(1979 年第 3 项决议)国际计量大会通过并生效的米、秒和坎德拉的当前定义将被废除。

大会决议进一步指出，在废除旧定义之后：

1. 千克国际原器的质量仍然为 1 千克，其相对不确定度等同于被推荐的普朗克常数 h，之后的不确定度将通过实验来确定。

2. 真空磁导率 μ_0 等于 $4\pi\times10^{-7}$ 亨利每米，其相对不确定度等同于被推荐的精细结构常数 α，之后的不确定度将通过实验来确定。

3. 水三相点的热力学温度等于 273.16 开尔文，其相对不确定度等同于被推荐的玻尔兹曼常数 k，之后的不确定度将通过实验来确定。

4. 碳-12 元素的摩尔质量等于 0.012 千克每摩尔，其相对不确定度等同于被推荐的阿伏加德罗常数 N_A，之后的不确定度将通过实验来确定。

关于 SI 改制决议的全部内容，参见附录Ⅱ。

5.2　基本物理常数的评定

在 SI 改制的有关决议中，明确规定被采用的基本物理常数值必

须由国际科学技术数据委员会(CODATA)提供。那么,这是一个什么样的国际组织?由其提供的基本物理常数值为何具有如此高的效力呢?

要想了解国际科学技术数据委员会的性质,便要回到二十世纪初。那时就有人注意到,对于特定的物理常数,可以通过多种方式加以测量,相应地便产生了一个不同来源的结果之间是否协调一致的问题。因此,有必要将出现在公开报道中的各项数据收集起来并一一加以评判,最终得出一个较为合理的结果。1926 年,由瓦希本(E. W. Washburn)主编的《国际评定表》第一卷(International Critical Tables, vol. 1)问世,书中刊载了大量经过认真审核的物理学和化学常数,大大方便了那些在其工作中经常需要用到这些常数的科技工作者。

1929 年,伯奇(R. T. Birge)发表了《普通物理常数的可几值》一文,对基本物理常数进行了系统的分析评定。通过将不同来源的数据加以比较,挑选出彼此间相互吻合的那些结果,然后运用最小二乘法得出被选常数最可几值的方式向公众推荐一组值得信赖的物理常数值。在此后的 20 多年间,陆陆续续出现了一些类似的评定结果。它们拥有一个的共同特点,那就是全凭作者的一己之力来完成对众多实验数据的搜集和整理工作。1955 年,科恩(E. R. Cohen)开始尝试与他人合作评定物理常数,从而开创了汇聚众人力量来研究基本常数问题的先河。

1966 年,在国际科学协会理事会(ICSU)的领导下,成立了国际科学技术数据委员会(CODATA),其宗旨是在全世界范围内促进科学技术数据的搜集、分析和编撰工作。CODATA 下属的一个基本常数工作组,专门负责与基本常数有关的事宜。工作组定期发布一套面向国际的、自洽的、建立在所有现存相关数据之上的基本物理常数值。从那以后,基本物理常数的评定就变成了国际科学技术数据委员会的一项工作职责。在该组织的统一领导下,国际上有能力的研究机构按照分工协作的原则开展有关研究,从而有力推动了基本常数领域的发展与进步。

以上叙述涉及了常数的测量和评定这两个术语。所谓常数的测量，就是将某个基本常数作为直接的实验目标。像前文所介绍过的通过种种方法针对光的传播速度所开展的工作就是测量。类似的还有采用油滴法确定电子的电荷，利用光电效应确定普朗克常数等工作。对于大多数的物理常数而言，这种通过直接测量的方法所获得的结果，由于精度方面的原因已失去了竞争力。

所谓常数的评定，是指将所有与基本物理常数有关的信息加以全面、综合的考虑，最终得出一套具有自洽性(self-consistent)的常数值。通常将有关信息划分成两种类型：输入参数和经验公式。其中输入参数是一些测量结果(相对而言，有着较高的可信度)；经验公式则是与这些测量结果直接相关的理论表达式，起着将某些基本物理常数与测量结果关联起来的作用。从输入参数与经验公式这两者的结合中，可以获得少数几个关键性常数的最佳数值，它们又被称作调整参数。有了这些参数的数值之后，再借助一些物理学公式，便可以得出其他的常数值。从输入参数的收集到各项常数值的得出这一整套工作就称为常数的评定。

在近些年的常数评定工作中，被 CODATA 选中的输入参数有电子反常磁矩的测量值、氢原子的精细跃迁频率、不同粒子的磁矩比、不同原子的质量比、中子衍射数据和硅格点间距等。被选作调整参数的有里德伯常数、精细结构常数、普朗克常数、原子质量单位制中各种粒子的质量等。自 1998 年以来，经 CODATA 评定发布的 4 届基本物理常数推荐值(简表)汇总在附录Ⅲ中。

5.3　几个重要的物理常数

首先来谈谈里德伯常数。

早在十九世纪中叶，人们就发现原子光谱具有分立性的特征。对于这一物理现象，人们在很长一段时间内都百思不得其解：为什么会这样？彼此分隔开来的谱线之间是否存在着某种内在关联性？

1884 年，瑞士的一名中学数学教师巴尔末做出惊人的一项工作。经过潜心研究，他发现氢原子光谱线的波长满足如下公式：

$$\lambda = B\frac{m^2}{m^2-4}$$

其中 m 是大于 2 的正整数，参数 B 取值 $3\ 645.6\times10^{-10}$ 米。在随后的 1890 年，瑞典物理学家里德伯在整理更多元素的光谱资料时，得到了现如今被称作里德伯公式的、更具普适性的规律：

$$\frac{1}{\lambda} = B\left(\frac{1}{(n_1+\delta_1)^2} - \frac{1}{(n_2+\delta_2)^2}\right)$$

其中 n_1，n_2 为正整数；δ_1，δ_2 是两个起调节作用的参数；B 是一个与元素种类无关的普适性常数，现如今被称作里德伯常数，用符号 R_∞ 表示。至此，关于分立的光谱线之间是否存在关联性的问题就得到了很好的解决。至于为何是这个样子，仍然不得而知。

进入二十世纪后，随着普朗克的黑体辐射和爱因斯坦的光电效应理论的建立，丹麦物理学家玻尔于 1913 年针对氢原子的微观结构创建了一个理论，其中创造性地提出了如下基本假设：

(1) 定态假设：原子只能处在一系列不连续的能量状态之中，此时的电子虽然围绕着原子核高速旋转，但并不因为旋转运动的变速性而向外辐射能量。这种相对稳定的状态称为定态。

(2) 跃迁假设：因为某种原因电子在两个不同的定态之间发生跃迁时，会发出或吸收一定频率的电磁辐射。该辐射的频率 ν 与两个定态之间的能量差 ΔE 有着如下简单的算术关系：

$$h\nu = \Delta E$$

其中 h 代表普朗克常数。

(3) 轨道量子化假设：由于能量状态的不连续性，电子绕核运动的轨道半径不能任意取值，必须满足下述量子化条件：

$$m\nu r = n\frac{h}{2\pi} \qquad (n=1,2,3\cdots)$$

在以上三条假设的基础上，玻尔成功地解释了氢原子光谱线的分立性，同时给出了里德伯常数 R_∞ 的理论表达式。

然而美中不足的是，玻尔的理论只能解释氢原子光谱在低分辨率

下的粗结构，至于在高分辨率下所呈现出来的精细结构，则表现得无能为力。1915 年 1 月，玻尔指出在电子的轨道运动中应该考虑相对论效应，因此出现在相关公式中的动量和能量都应该采用相对论形式。但是玻尔本人并没有给出进一步的结果。

1914 年冬至 1915 年秋，德国物理学家索末斐计算了类氢原子的相对论性轨道。他认为电子的运行轨迹应该近似于椭圆形，同时还应该呈现出一种类似于行星近日点进动性质的变化。这意味着在电子绕核旋转的同时，核自身也在运动着。因此，在描述电子运动的特点时，还应该考虑到原子核的质量效应。1916 年 1 月，索末斐发表了经过修正的电子能级公式

$$E_{n,l}=-R_{\infty}\left[\frac{Z^2}{n^2}+\frac{\alpha^2 Z^4}{n^3}\left(\frac{1}{l}-\frac{3}{4n}\right)\right]+O(\alpha^4)$$

从该式不难看出，各轨道的能量除了与主量子数 n 有关之外，还与轨道的角动量量子数 l 密切关联着。在主量子保持不变，而角动量量子数发生改变时，原子轨道的能量会发生细微的变化。这一变化最终将反映在氢原子光谱的精细结构上。这是针对原子光谱线为何具有精细结构所给出的首个解释。

虽然索末斐的原子模型与玻尔模型相比有了很大的进步，但在处理稍微复杂一些的原子，譬如仅仅含有两个电子的氦原子的光谱时，就遇到了严重的困难。物理学的进一步发展表明，描述电子与电磁辐射之间相互作用的正确理论应该是量子电动力学。这一理论认为，两个带电粒子，譬如两个电子，是通过彼此间交换光子而发生相互作用的。这种交换可以采取多种方式。其中最为简单的是一个电子发射出一个光子之后，该光子立即被另一个电子吸收掉；稍稍复杂一些的是一个电子发射出一个光子之后，该光子立即转化成电子——正电子对，后者既可以重新湮灭为光子，也可以由其中的正电子与早先的那个电子一起湮灭掉，使得表观上看起来像是被湮灭的电子运动到了新产生的那个电子的位置上；更为复杂一些的是由光子转化而来的电子——正电子对也可以发射光子，该光子随后还可以转变成另一对正、负电子等等。所有这些可能的过程，都对两个电子在亚微观层次

上所表现出来的相互作用有所贡献。只不过,随着光子吸收或发射次数的增多,对总作用的贡献率呈现出一种指数式下降。

再回到氢原子。根据量子电动力学,带正电荷的原子核和带负电荷的电子之间产生的相互作用会受到多种因素的影响,因此各能级,或者等价地,电子在不同能级间跃迁时所产生的电磁辐射频率有着十分复杂的表达式。以 1s→2s 的跃迁为例,有关公式为

$$v_H(1s_{1/2}-2s_{1/2})=\frac{3}{4}R_\infty c\left[1-\frac{m_e}{m_p}+\frac{11}{48}\alpha^2-\frac{28}{9}\frac{\alpha^2}{\pi}\ln\alpha^{-2}-\frac{14}{9}\left(\frac{\alpha R_p}{\Delta_C}\right)^2\right]$$

其中 m_p 是质子的质量,R_p 是质子半径的均方值,Δ_C 是电子的康普顿波长与 2π 之比。方括号中位于数字“1”之后的 4 个修正项分别代表着质量衰减、相对论效应、辐射以及质子存在着有限大小这 4 个因素对辐射频率所产生的影响。

从实际结果看,4 个修正项所具有的总的相对不确定度处于 10^{-13} 量级。因此,如果能够得到高精度的跃迁频率,就能够得到高精度的里德伯常数值。进入上世纪八十年代之后,随着激光光谱学的快速发展,里德伯常数的测量精度得到了大幅提升。以 1986—1987 年间所报道的数据为例:

$R_\infty=10\ 973\ 731.569(7)\,m^{-1}$　　P. Zhao et al. ,1986

$R_\infty=10\ 973\ 731.569(6)\,m^{-1}$　　F. Birabon et al. ,1986

$R_\infty=10\ 973\ 731.573(3)\,m^{-1}$　　P. Zhao et al. , 1987

$R_\infty=10\ 973\ 731.571(7)\,m^{-1}$　　R. G. Beusoleil et al. ,1987

$R_\infty=10\ 973\ 731.573(3)\,m^{-1}$　　M. G. Boshier et al. ,1987

其中每项结果的不确定度均达到了 10^{-10} 量级。

进入上世纪九十年代以后,随着光频梳技术的运用,人们将电磁辐射的波长测量改为了频率测量,此举使得里德伯常数的相对不确定度在以上结果的基础上又降低了 2 个数量级,从而达到了创纪录的 10^{-12}。在进行常数评定时,由不同文献提供的氢原子跃迁频率扮演着输入参数的角色,而里德伯常数则以调整参数的身份出现。

其次来谈谈电子的反常磁矩。

电子的发现与阴极射线有关。

关于阴极射线的本质问题，曾经引起过物理学界的激烈争论。论战一方是克鲁克斯、佩兰等人，主张阴极射线是带负电荷的“分子流”；另一方是哥德斯坦、赫兹等人，认为阴极射线是一种电磁波。双方势均力敌，相持不下。

为了将问题弄个水落石出，英国物理学家 J. J. 汤姆逊采用旋转镜法测量了阴极射线的速度，结果发现其数值远低于光速，初步证明阴极射线并非电磁波。与此同时，汤姆逊还观察到阴极射线能够在横向电场或磁场中发生偏转，说明阴极射线是由带负电的细小粒子组成的射流。很显然，汤姆逊给出的实验结果支持了克鲁克斯和佩兰一方的观点。

但是，克鲁克斯和佩兰有关“分子”的说法是不正确的。因为稍后汤姆逊又测量了组成阴极射线的细小粒子的荷质比，发现该比值不仅与阴极射线管所充盈的气体种类无关，而且与制作阴极所使用的金属材料之间亦无关联。由此汤姆逊断定，组成阴极射线的带电粒子应该是所有物质的共同组成成分，并把这种粒子称为“电子”。1909 年，美国物理学家罗伯特·密立根通过油滴实验率先测量出了电子所携带的电荷值，其结果为

$$e=(4.772\pm0.005)\times10^{-10}\,\mathrm{esu}$$

至于电子是所有物质的基本组成部分，则等到玻尔提出了氢原子结构模型之后才得到证实。为了构建这一理论模型，玻尔将电子引入到氢原子当中，处在带正电的原子核的外围。由于静电引力的缘故，带负电的电子在一系列圆形轨道上围绕着带正电的原子核在不停地旋转，产生于正、负电荷之间的静电引力提供维持旋转运动所需的向心力。当电子从一条圆形轨道转移到另外一条轨道上时，会吸收或释放出一定频率的电磁辐射。该频率与普朗克常数相乘的积，等于电子在两个轨道上所携带的能量之差。玻尔提出的理论首次让电子在原子的形成上扮演了不可或缺的角色。

然而，玻尔的理论并不能概括与原子有关的全部实验现象，譬如原子光谱在磁场作用下所表现出来的那些变化行为。这类实验起始于英国物理学家法拉第。法拉第曾经将发射原子谱线的火焰置于强

磁场之中，目的是为了观察光与磁场之间是否存在着相互作用，结果是一无所获。到了1896年8月，当一位年轻的荷兰学者塞曼运用一些新发明的仪器重做这类实验时，却有了新的发现——钠元素的D谱线之间的间距被磁场加宽了。

1897年，塞曼进一步发现镉的蓝色谱线($\lambda=480\ \mu m$)能够分裂成2条或是3条较为细小的谱线。到底是2条还是3条，则取决于光的发射方向是平行还是垂直于磁力线方向。对于这一实验结果，可以从洛伦兹后来提出的有关理论中获得很好的解释。正是由于这个原因，人们将这类分裂现象称为正常塞曼效应。

除此之外，还存在着一类被称作反常塞曼效应的谱线分裂现象，其特点是运用洛伦兹理论无法加以解释。反常分裂最早为法国物理学家考尔纽(M. A. Cornu)所发现。1898年，考尔纽在研究钠元素谱线的分裂情况时，注意到D_1线由1根变为了4根。

直到二十世纪二十年代，反常塞曼效应仍然不为人们所理解。局面的改变出现在1921年，彼时兰德提出了如下能量位移公式：

$$\Delta E=mg\mu H$$

其中g被称为电子的g因子(并非重力加速度)，m是量子数，取一系列分立值

$$m=-j,-j+1,-j+2,\cdots,j-1,j$$

代表总角动量量子数j在观察方向上所给出的分量。综合各类观测所给出的结果看，对于碱金属元素，m应该取半整数，这意味着此时的j也是一个半整数。

问题是，j如何取得半整数呢？

对于这样一个问题，兰德在1923年提出了如下解决方案：

$$\vec{j}=\vec{l}+\vec{R}$$

其中l是碱金属原子中价电子的轨道量子数，R是由内层电子组成的原子实所具有的角动量量子数，取值1/2。在此基础上，电子的g因子可表示成

$$g=1+\frac{j(j+1)+R(R+1)-l(l+1)}{2j(j+1)}$$

由上式给出的一项特别结果是：$l=0, j=1/2, g=2$。

1924 年 12 月，泡利发文指出，有关原子实角动量的说法是毫无意义的。另一方面，来自实验方面的结果清楚地表明，兰德关于电子 g 因子的描述是正确的。于是，在肯定泡利看法的前提下，必然得出 R 取值 1/2 另有缘由这样的结论。对此泡利的看法是，R 与价电子本身有关，代表着价电子所拥有的一种属于量子范畴的二值性。关于这种二值性，泡利还进一步指出：第一，它适用于原子中的每一个电子；第二，它是电子除 n、l 和 m 之外的第四个量子数。至于该量子数所代表的物理含义，泡利只字未提。

关于量子数 1/2 的含义问题，最终由乌伦贝克和高斯密特合作解决。两人在 1925 年 10 月发表的一篇论文中指出，泡利所发现的二值性量子数代表着电子的自旋运动。从那以后，该量子数就被称为电子的自旋量子数。

1927 年 5 月，泡利为描写电子的自旋矢量$\vec{s}$，在粒子物理学中引进两行两列的 2×2 型矩阵

$$\vec{s}=\frac{1}{2}\cdot\frac{h}{2\pi}\vec{\sigma}$$

其中$\vec{\sigma}$的分量分别是

$$\sigma_1=\begin{pmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{pmatrix},\quad \sigma_2=\begin{pmatrix}0 & -i\\ i & 0\end{pmatrix},\quad \sigma_3=\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix}$$

这样做，一方面能够很方便地表示出自旋的二值性特点，另一方面又能够自动满足角动量的对易规则所提出的有关要求：

$$\sigma_i\sigma_j+\sigma_j\sigma_i=2\delta_{ij}$$

其中

$$\delta_{ij}=1, i=j$$
$$\delta_{ij}=0, i\neq j$$

针对泡利所给出的$\vec{\sigma}$矩阵，英国物理学家狄拉克发现存在着如下关系式：

$$(\vec{\sigma}\cdot\vec{p})^2=\vec{p}^2\cdot\mathbf{1}$$

其中$\vec{p}$是动量矢量，**1** 是 2×2 型单位矩阵。在此之后，狄拉克便开始思考如何将$\vec{p}^2$由三个分量的平方和推广到四个分量的平方和问题，并最终得出

$$p_1^2+p_2^2+p_3^2+p_4^2=-m^2c^2,\ p_4=\frac{iE}{c}$$

以此为基础，倘若将泡利的两行两列矩阵推广到四行四列

$$\vec{\sigma}=\begin{pmatrix}\vec{\sigma}_P & 0\\ 0 & \vec{\sigma}_P\end{pmatrix}$$

（其中$\vec{\sigma}_P$是 2×2 型泡利矩阵，0 代表着 2×2 型零矩阵）那么就可以得到如今大名鼎鼎的狄拉克方程：

$$\sum_\beta\left[\sum_\mu(\gamma_\mu)_{\alpha\beta}\frac{\partial}{\partial x^\mu}+\frac{mc}{h/2\pi}\delta_{\alpha\beta}\right]\psi_\beta=0$$

$$x^\mu=\vec{x},ict$$

利用上述方程能够证明，在一个中心势场中，矢量$\vec{j}$

$$\vec{j}=\vec{x}\times\vec{p}+\frac{1}{2}\cdot\frac{h}{2\pi}\cdot\vec{\sigma}$$

是一个运动常数，并且包含着电子的自旋运动。这样一来，狄拉克方程就给了电子自旋运动一个合理的出处。

不过，根据狄拉克方程，电子的 g 因子应该取值整数 2，而非实际测量出的略大于 2 的一个数值。现在，人们习惯性地将电子的 g 因子表示成如下形式：

$$g=2(1+a_e)$$

其中的 a_e 被称作电子的反常磁矩，其数值能够在实验中以极高的精度测量出来。

最后来谈谈精细结构常数。其定义式为

$$\alpha=\frac{e^2/4\pi\varepsilon_0}{hc/2\pi}$$

首次出现是在索末斐关于氢原子能级的精细描述当中：

$$E_{n,l}=-R_\infty\left[\frac{Z^2}{n^2}+\frac{\alpha^2 Z^4}{n^3}\left(\frac{1}{l}-\frac{3}{4n}\right)\right]+O(\alpha^4)$$

由于直接牵涉到氢原子光谱的精细结构，故而被称作精细结构常数。

精细结构常数有着十分丰富的物理内涵。例如，在玻尔的氢原子结构模型中，电子处在能量最低轨道上的运动速率

$$v_0=\frac{e^2/4\pi\varepsilon_0}{h/2\pi}$$

与光速之比

$$\begin{aligned}v_0/c&=\frac{e^2/4\pi\varepsilon_0}{hc/2\pi}\\&=\alpha\end{aligned}$$

等于 α。与此同时，能量最低轨道所具有的半径

$$a_0=\frac{h/2\pi}{m_e}\cdot\frac{h/2\pi}{e^2/4\pi\varepsilon_0}$$

与电子的康普顿波长

$$\lambda_C=\frac{hc/2\pi}{m_e c^2}$$

之比的倒数

$$\begin{aligned}(a_0/\lambda_C)^{-1}&=\left(\frac{h/2\pi}{m_e}\cdot\frac{h/2\pi}{e^2/4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{m_e c^2}{hc/2\pi}\right)^{-1}\\&=\frac{e^2/4\pi\varepsilon_0}{hc/2\pi}\\&=\alpha\end{aligned}$$

以及两个相距 λ_C 的电子之间的静电相互作用能

$$E_{\lambda_C}=\frac{e^2/4\pi\varepsilon_0}{hc/2\pi m_e c^2}$$

与一个电子的静止能量

$$E_0=m_e c^2$$

之比

$$E_{\lambda_C}/E_0=\frac{e^2/4\pi\varepsilon_0}{hc/2\pi m_e c^2}\cdot\frac{1}{m_e c^2}=\frac{e^2/4\pi\varepsilon_0}{hc/2\pi}=\alpha$$

也都等于 α。由此可见，α 是一个能够将多个物理量关联起来的重要参量。

能够体现出 α 之重要性的是电子反常磁矩 a_e 的幂级数展开式：

$$a_e=C_e^{(2)}\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)+C_e^{(4)}\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2+C_e^{(6)}\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3+C_e^{(8)}\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4+$$

$$C_e^{(10)}\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^5+a_e(had)+a_e(weak)+\delta_e$$

其中 $C_e^{(2i)}$ 可以通过推广的量子电动力学方法计算出来；$a_e(had)$代表强子真空极化对 a_e 造成的影响；$a_e(weak)$代表电弱相互作用所带来的影响；δ_e 代表理论的不确定性，约为 1.1×10^{-12}。在基本物理常数的评定工作中，通常将正、负电子反常磁矩的测量结果加以平均，然后将其代入到上述级数展开式当中，运用迭代的方法计算出精细结构常数 α 之值。

原则上讲，从电子反常磁矩中计算出来的 α 还应该与通过其他途径导出的 α 相比较，以便得出一个综合性的结果。但由于电子反常磁矩的测量精度远高于一般的数据，同时人们对于上述幂级数展开式又确信无疑，因此通常的做法是将来自电子反常磁矩的结果直接设定为 α 应该采取的数值。

5.4 精细结构常数的可计算性

在上文所介绍的三个常数中，精细结构常数有些与众不同。其特殊之处就在于，这是一个不携带量纲的纯数性物理量。

正因为这一点，精细结构常数一经发现，便引起了人们的高度关注。原因很简单，作为一个纯数，人们很容易联想到它能否通过纯数学的方法计算出来而不必依赖于实验测量。

伟人爱因斯坦关于物理常数的某些想法为纯数学地计算出精细结构常数提供了强大的信念支持。爱因斯坦的想法集中体现在他于 1945 年 5 月写给伊尔莎·罗森塔尔-施内德(Irse Rosenthal-Schneider，普朗克从前的一个学生)的一封信当中。在信里，爱因斯坦这样写道：

> 关于普适常数的问题，……(普遍的看法是)存在着两类常数：表观的和真正的常数。表观的常数只不过是引进任意单位的结果，因此是可以改变的；真正的常数则是名副其实的数字，是上帝屈尊创造这个世界时所作出的武断选择。我的看法是——简单地说——第二类常数并不存在。至于它们为什么会出现，那是因为我们对于大自然还不具有足够深入的了解。(一旦做到了这一点，)我相信这类数字只可能源自一种基本形式，如 π 或 e。

爱因斯坦所说的“真正的常数”，亦即“第二类常数”，指的是如同精细结构常数那样不随所带单位的变化而变化的物理量。对于这类参量，爱因斯坦相信，一旦人们看清楚了大自然的本来面目，就能够将其约化成某些基本的数学参量，如圆周率 π 或者自然对数的底数 e 等。

事实上，相信精细结构常数可以进行数学解析的物理学家为数众多，其中还不乏一些声名显赫的大家。从时间上看，英国物理学家艾丁顿，即通过天文观测证实爱因斯坦所提出的光线可以发生弯曲理论的那个人，最先将有关信念落实到了行动上。艾丁顿曾运用纯逻辑的方法证明 α 的倒数等于 136，后来又发文指出在原先的推导中存在着一个小小的错误，正确的结果应该是 137。

接下来是德国物理学家、矩阵力学的创立者沃纳·海森伯。1935 年 3 月，海森伯在写给狄拉克的一封信中指出，精细结构常数的倒数值很可能是

$$\frac{1}{\alpha}=\frac{2^4 3^3}{\pi}$$

另一位物理学大家，被誉为“物理学的良心”的沃尔夫冈·泡利，虽然没有像海森伯那样提出一个直接描写精细结构常数的数学式，但是终其一生都未曾放弃对于这个物理量的深入思考，直到临终前还对精细结构常数的倒数值137念念不忘。1958年，泡利因病住进了苏黎世的Rotkreuz医院。有一天，他的助手查尔斯·恩兹(Charles Enz，《泡利物理讲义》的主编)去医院看望他，泡利询问恩兹是否注意到了房间的门牌号，恩兹回答说没有。泡利告诉他说那是137号。几天之后，泡利就在这个房间里溘然长逝。

著名物理学家、量子电动力学创始人之一、费曼图的发明者、《费曼物理讲义》的撰写人理查德·菲利普斯·费曼，在其于1985年写就的《QED：光与物质的奇妙理论》一书中，针对精细结构常数写下了下面这段文字：

> …It has been a mystery ever since it was discovered more than fifty years ago, and all good theoretical physicists put this number up on their wall and worry about it. Immediately you would like to know where this number for a coupling comes from: is it related to pi or perhaps to the base of natural logarithms? Nobody knows. It's one of the greatest damn mysteries of physics: a magic number that comes to us with no understanding by man. You might say the "hand of God" wrote that number, and "we don't know how He pushed his pencil." We know what kind of a dance to do experimentally to measure this number very accurately, but we don't know what kind of dance to do on the computer to make this number come out, without putting it in secretly!

这段话翻译过来就是：

> ……(精细结构常数)这个数字自从50多年前被发现以来就一直是个谜。所有优秀的理论物理学家都将其贴在墙上细细琢磨，渴望揭开这个耦合常数的由来：它与圆周率π或自然对数的底数e有关吗？问题至今无解。这是物理学中最顶

> 级的谜题之一，一个该死的谜，如魔数一般令人困惑不已。你也许会说是“上帝之手”写下了这个数字，而我们是不可能知道他是如何“运笔”的。在实验上人们已经把这个数测量得很准确，但是没有人知道从计算机上如何清清楚楚地得到它！

文中所提到的圆周率 π 和自然对数的底数 e，正是爱因斯坦先前所猜测的那两个数学参量，说明费曼非常重视爱因斯坦在前述信件中所表达出来的观点。

按照费曼的说法，理论物理学家们都希望解决精细结构常数的可计算性问题。之所以如此，是因为该问题一旦得到了圆满解决，极有可能将物理学推进到一个全新的阶段。不过令人遗憾的是，自从费曼写下上述文字以来，又一个 30 年过去了，精细结构常数的可计算性问题依然如故。

第6章 潜在的问题

6.1 是是非非的量子电动力学

从前文的介绍中已然得知，精细结构常数与量子电动力学密切关联着。那么量子电动力学在精细结构常数的理论计算上为何不能有所作为呢？

通常认为，量子电动力学主要是在以下工作的基础上建立起来的：

M. Born and P. Jordan，Zeitschr. f. Phys. 34，858，1925；

M. Born ，W. Heisenberg and P. Jordan，Zeitschr. f. Phys. 35，557，1925；

P. A. M. Dirac，Proc. Roy. Soc. A 114，243，1927；

P. A. M. Dirac，Proc. Roy. Soc. A 114，710，1927；

P. Jordan and E. Wigner，Zeitschr. f. Phys. 47，631，1928；

P. A. M. Dirac，Proc. Roy. Soc. A 117，610，1928；

P. A. M. Dirac，Proc. Roy. Soc. A 118，351，1928；

W. Pauli and W. Heisenberg，Zeitschr. f. Phys. 56，1，1929；

W. Pauli and W. Heisenberg，Zeitschr. f. Phys. 59，168，1930。

这些工作对于物理学所面临的某些基本问题提出了一些假设。这些假设一方面促进了量子电动力学的发展，但在另一方面，也造就了日后令量子电动力学难以逾越的某些障碍。在量子电动力学所涉及的基本问题中，电子的大小可以说是一个根本性的问题。

电子有大小吗？

自从电子被发现以来，这一直都是个问题。

从众多的实验结果看，电子乃携带着一定质量和电荷的客观实体是一个不争的事实。既然如此，根据通常的经验，凡是客观实体，必定具有一定程度的空间延展性，即拥有明确的几何尺度。因此在二十世

纪初，有人就提出了一个经典半径的概念，用 r_e 表示：

$$r_e=\frac{e^2/4\pi\varepsilon_0}{m_e c^2}$$

不过，想让这一概念发挥作用，还必须解决电子自身的稳定性问题。为此，法国的数学兼物理学家庞加莱引进一种表面张力以平衡来自电子内部的电磁斥力，进而维持住电子自身的稳定性。1911 年，M. von Laue 进一步指出，带有庞加莱张力的电子，其能、动张量满足相对论提出的协变性要求，表明张力方案与相对性原理相容。话虽如此，对于庞加莱张力的物理本质，人们始终无法说出个所以然来。而且更为糟糕的是，所有针对电子大小所开展的探测活动均以失败而告终。

在玻尔建立起氢原子的结构模型之后，人们便发现就氢原子光谱的解读而言，无需涉及诸如电子的大小或其内部结构这类问题。在海森伯提出矩阵力学之后，物理学家泡利在运用新力学推导氢原子分立光谱的过程中，同样没有涉及电子的任何具体特征。由此看来，无论是玻尔的旧量子论还是后来的量子力学，都将电子约化成了一个没有空间延展性的客体。换句话说，在描述微观世界的客观规律时，可以放心地把电子当作点粒子对待。对此，Y. I. Frenkel 给出了一个很好的总结：

> （电子的大小及其内部结构问题）之所以产生，是因为人们把一种只能运用于原子等组合系统的分割原则，不谨慎地应用到了作为物质最基本组分的电子之上所产生的结果。电子不仅在物理上是不能分割的，而且在几何上也不能够加以分割。

鉴于此，量子电动力学将电子作为点电荷看待，从而规避了电子自身的结构在电子与电磁场的相互作用中可能带来的复杂性，使理论对于相互作用的描述得以简化。然而美中不足的是，点粒子图像与海森伯的不确定原理一经结合，便产生出高能虚状态问题，最终导致所有的计算过程均给出无穷大这一结果。

除了电子的大小之外，量子电动力学还面临着另一个重要问题——如何描写微观粒子之间的相互作用。在玻尔的氢原子理论中，

处在能量较高轨道上的电子，可以通过发射光子的方式失去部分能量而跃迁到能量较低的轨道上去。在此之前，被发射的光子身处何处？反之，处在能量较低轨道上的电子，通过吸收光子的方式增加能量后，也可以跃迁到能量较高的轨道上去。那么被吸收掉的那个光子之后去了什么地方？

实际上，被辐射出来的光子是电子发生跃迁时创生出来的，此前并不存在；被吸收掉的光子被湮灭掉了，之后也不存在。这表明，电子的状态每发生一次改变，都将伴随着光子的产生或者湮灭。对于出现在电子与光子之间的这种相互作用新模式，该如何加以描写呢？

这个问题的最终解决与英国物理学家狄拉克息息相关。1924 年前后，狄拉克注意到含时薛定谔方程对于时间的求导是一阶的，而对于空间的求导则是二阶的，时间与空间在此表现出了明显的不对称性，这是个问题。因为根据狭义相对论，时间与空间应该完全对等。带着这个问题，狄拉克进一步注意到，从时间与空间坐标处于同等地位的如下标量方程及其共轭式中：

$$\left(\Box-\frac{m^2c^2}{\hbar^2}\right)\psi=0$$

$$\Box=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}$$

能够推导出下述连续性方程：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}-div\vec{j}=0$$

其中

$$\rho=\frac{i\hbar}{2mc^2}\left(\psi^*\frac{\partial\psi}{\partial t}-\frac{\partial\psi^*}{\partial t}\psi\right)$$

$$\vec{j}=\frac{i\hbar}{2m}\left(\psi^*\vec{\nabla}\psi-\vec{\nabla}\psi^*\cdot\psi\right)$$

不过，这里的 ρ 并非正定，因此不能被解释成几率密度。如果想让 ρ 保持正定，则波动方程在$\partial/\partial t$之后就必须是线性的。为此，狄拉克引进四行四列的矩阵来描写电子的运动，最终得到了可以列为二十世纪人

类在科学研究领域所取得的最高成就之一的狄拉克方程。该方程除自动包含了电子的自旋运动之外，在满足一定条件的情况下，还能够给出托马斯因子。

不仅如此，狄拉克方程还给出了一个令人匪夷所思的结果：电子可以处于负能量状态。之所以匪夷所思，是因为这样的结果有违物理学常识。但是狄拉克并没有轻易地予以放弃，而是展开了深入思考。一年之后，狄拉克终于理解了负能态的真实含义，并提出了一幅有关电子跃迁的新图景：真空中充盈着大量处在负能态上的电子，如同一个由负能态电子组成的大海。如果海中的电子通过吸收光子获取了足够的能量而跃出大海时，便会在海中留下一个空穴。由于空穴缺少负电荷，因此看起来就像是一个带着正电荷的电子在运动，从而导致电子的跃迁过程表现为光子的湮灭和电子-正电子对的产生。反之，当一个电子回填到空穴里时，先前跃出海面时所吸收的能量得到了释放，致使回填过程表现为电子-正电子对的湮灭和光子的产生。这样一来，最早出现在玻尔理论中的光子产生和湮灭机制，同样适用于电子，由此还催生出了反粒子概念。

于是粒子的产生和湮灭就成为了描写微观粒子之间相互作用时不可或缺的内容。在具体手法上，狄拉克借用了玻恩、海森伯和约当在其发表的《量子力学Ⅱ》一文中将谐振子的量子数 n 视为振动量子的数目这一思想。对原子系统与辐射之间的相互作用作含时微扰处理时，以自然的方式引进了粒子的产生和湮灭算符。这种方法后来被称作“二次量子化”。

二次量子化与先前所说的点粒子图像结合后，使得在量子场论中，任何两个微观粒子之间的相互作用都不再是一个简单的二体问题，而是一个无限多体的问题。因此，趋于无穷大是量子场论中所有计算过程必然得出的一个结果，进而导致量子电动力学在很长一段时间内无所作为。

直到第二次世界大战结束之后，局面才有所改观。为了解释兰姆位移，朝永振一郎、施温格以及费曼等人以各自独立的方式发展起了一种被称作“重正化”的技术，用于从无穷大的计算结果中提取到有用

的信息。

所谓兰姆位移，是指氢原子光谱所表现出来的 $2s_{1/2}$ 能级的能量稍高于 $2p_{1/2}$ 能级这一实验现象。按照狄拉克提出的质子-电子相互作用理论，$2s_{1/2}$ 与 $2p_{1/2}$ 这两个能级本该是简并的。1948 年 9 月，朝永振一郎报告了其研究小组针对兰姆位移所做的计算，所得结果是正确的。紧接着，在 1949 年的年初，施温格和费曼分别发表了各自的计算结果，同样得到了正确的答案。这样，在 1949 年 4 月，于纽约以北 60 公里的哈德逊老石头城举行的学术会议上，重正化处理方案就得到了与会者的基本认可。

然而，时间过去仅仅两年，狄拉克便发表了一篇质疑量子电动力学的论文。他在文中写道："新近兰姆、施温格和费曼以及其他人的工作是非常成功的……但有关理论是丑陋和不完备的。"在狄拉克看来，所谓的重正化方法既没有一个可靠的数学基础，也没有一个令人信服的物理图景。其实对于狄拉克提出的这两点指责，普通人也不难以理解。从数学上看，重正化要求忽略无穷大量而非有限量，这与数学中的惯常做法正好相反；物理上，以电子磁矩的辐射修正为例，重正化方法认为电子在部分时间里处于离解状态 $e+\gamma$。其中的 γ 称作虚光子，它在部分时间里可以离解成轻子-反轻子对，如 $e^- + e^+$ 或 $\mu^- + \mu^+$ 等。事实上，不仅仅是轻子对，虚光子 γ 可以离解成任何带电粒子及其反粒子对，并且这些带电粒子对还可以耦合到其他的场，如介子场等。后者也可以发生离解，并且对于电子的磁矩同样有贡献。如此说来，小小的一个电子，其一举一动均可以搅翻宇宙中所有的粒子，这合理吗？

因此，在《量子场论的起源》一文中，狄拉克写道：

> 我们应当接受这样的观点，目前关于电子与电磁场相互作用的理论必定存在着某些根本性错误。所谓根本性，我的意思是指力学错了，或者是相互作用错了。这个理论错误的程度就像当年玻尔轨道错误的程度一样。
>
> ……………
>
> 需要有一些新的相对论性方程，还必须引进新的相互作

用。一旦构思出这些新方程和新的相互作用，那么今天难倒我们的那些问题就可以迎刃而解了，再无必要使用重正化这类不合逻辑的方法。重正化在物理上是十分荒谬的，我一直反对它。它只能是给出某些结果来的经验算法而已。尽管它取得了一定的成功，但我们还应该准备彻底放弃它。

之所以在意狄拉克所说的这番话，是因为狄拉克不仅是量子场论的创始人，实际上还是重正化方法的创始人。早在1933年，当他抛弃了负能态粒子海，开始转向充斥着不断产生和湮灭着的粒子-反粒子对真空概念时，狄拉克就讨论了真空的极化问题，并提出了将电荷加以重正化处理的思想(不幸遗漏了质量的重正化)，这成为了日后发展起来的重正化理论的先导。而作为开创者，狄拉克想必对量子电动力学进行过极其深入的思考，在其观点的背后应该隐含着其他人难以触及的切身体会，因而值得人们格外重视。

事实上，为量子电动力学的建立和完善作出过重要贡献的几位物理学家，在经过后期的深入思考之后，都产生了与狄拉克十分相似的看法。例如，朝永振一郎在1966年曾经说道：

我们的(重正化)方法绝没有真正解决量子电动力学的基本困难。它只是在没有触及基本困难的前提下，给出了处理场效应问题的一种没有歧义的、连贯的方式。

到了二十世纪六七十年代，施温格认为，正统量子场论所采取的方法是首先引入属于虚构性质的结构和相互作用机制，在计算结果出现问题之后再来加以修正，以期获得与实验完全相符的结果。有鉴于此，施温格在1970年和1973年分别发表了论文《粒子、源和场》以及《一份量子电动力学的报告》，文中以数字量子场取代了正统的定域算符场(其中的源象征着对于物理系统进行测量时所引入的干涉)。

因量子电动力学而获得诺贝尔物理学奖的费曼在《QED：光与物质的奇妙理论》一书中，针对量子电动力学所使用的重正化技术写道：

不管这个词听起来多么聪明，我却要说这种处理方法是愚笨的。借助它虽然获得了一些好的结果，但无助于证明量子电动力学在数学上的自洽性。令人不解的是，尽管人们想

到了各种各样的办法，但是至今也没能证明量子电动力学的确自洽。我猜想，这是因为重正化在数学上是不合法的。

荷兰裔美国人阿伯拉罕·派斯（Abraham Pais）在其撰写的《基本粒子物理学史》一书中评论量子电动力学所给出的 α 幂级数展开式的有效性时，提示人们还应该明确了解其适用的界限。而一旦知晓了这个界限，派斯猜想那时的物理学很可能大不同于当前。

6.2 来自实验的困惑

存在于自然界的众多粒子中，有一类被称作轻子的，包括电子、μ 子和 τ 子这三种。除质量外，三种粒子在其他方面完全相同，不分伯仲。由此可知，μ 子应该拥有类似于电子反常磁矩的参量，称作 μ 子反常磁矩。其数值既可以通过实验测量，也可以通过理论计算得到。

实验测量工作起始于 1957 年。当时，美国哥伦比亚大学的实验物理学家 L. M. 莱德曼为探讨弱相互作用中宇称是否守恒的问题而研究了 π 介子和 μ 子的衰变过程，首次测量出了 μ 子的 g 因子等于 2.00 ± 0.1。从那以后，欧洲核子中心（CERN）和美国布鲁克海文（Brookhaven）实验室的实验物理学家们对 μ 子反常磁矩展开了持续的测量。所得结果的相对不确定度目前已达到了 10^{-7} 量级。

理论计算方面，物理学家们首先是在量子电动力学里，后来又在标准模型的整个框架内对 μ 子反常磁矩展开了详细的计算，所得结果的相对不确定度目前也达到了 10^{-7} 量级。不过，虽然在相对不确定度上非常接近，但是来自两方面的结果之间却表现出了明显的差异。

这种情形，在 μ 子反常磁矩的发展历程中曾经出现过两次。第一次发生在 1968 年，那时实验测量与理论计算结果之间出现了 1.7σ 的差距（σ 为实验与理论的联合标准差）。后来经过仔细检查，发现针对量子电动力学三圈图所做的计算中存在着错误。校正后，实验与理论计算结果之间就表现出了良好的吻合性。

第二次发生在 2001 年。当时美国布鲁克海文实验室里的物理学家们得到了精度为 1.3×10^{-6} 的如下结果：

$$a_\mu = 0.001\,165\,920\,2(14)(6)$$

与此同时，理论计算所给出的结果为

$$a_\mu=0.001\,165\,915\,96(67)$$

其相对不确定度更低，仅为 0.57×10^{-6}。两项结果之间的偏差达到了 43×10^{-10}，而其联合标准差却只有 16×10^{-10}，这样偏差就达到了标准差的 2.6 倍。这种情形出自偶然的概率仅为百分之一，因而引起了物理学界的高度关注。不知为何，这件事被《纽约时报》的记者获悉了，并引起了报纸编辑们的高度重视。随后《纽约时报》在其头版位置报道了这一消息，并冠以骇人听闻的标题：最细小的粒子捅了物理学理论一个大篓子（Tiniest of Particles Pokes Big Hole in Physics Theory）。

事后发现，物理学理论这张大网其实并没有被捅破。因为位于法国马塞的理论物理中心（Centre de Physique Théorique）的 M. Knecht 等人经过仔细检查后发现，理论计算中有一处错误。在纠正了这一错误后，实验与理论结果之间的偏差是其联合标准差的 1.6 倍，该结果出自偶然的概率为百分之十一。虽然仍不十分理想，但毕竟将矛盾的尖锐性给暂时平抑下来了。

然而好景不长，到了 2004 年，当物理学家们对最新的几组实验数据进行分析评定时，得到了 μ 子反常磁矩的一个新数值：

$$a_\mu=0.001\,165\,920\,80(63)$$

其相对不确定度为 0.54×10^{-6}。与此同时，理论计算也给出了新的结果：

$$a_\mu=0.001\,165\,917\,90(65)$$

其具有的相对不确定度与实验结果的几乎相等。但是，存在于两个数值之间的偏差却是显而易见的，使得矛盾再一次变得尖锐起来。

时至今日，实验与理论计算结果本身都只发生了轻微的改变，因此存在于两个数值之间的矛盾并没有得到缓解。有人将这一矛盾称作 μ 子反常磁矩之谜。谜底在哪儿：测量过程，计算过程，还是有关理论本身？

如果最终确认基本理论是引起矛盾的关键因素，那么狄拉克对于

量子电动力学所提出的批评以及该理论的创立者们后来所进行的反思就变得意味深长了。

6.3 并非尾声的尾声

根据第二十四届国际计量大会所通过的有关决议，一旦时机成熟，便将国际科学技术数据委员会(CODATA)所推荐的有关结果指定为普朗克常数、基本电荷、阿伏加德罗常数以及玻尔兹曼常数的准确数值，借此来重新定义质量、电荷、物质的量和热力学温度这几个物理量的基本单位。之所以采用国际科学技术数据委员会提供的结果，是因为人们相信该机构所得出的数据最为可靠。而采用可靠数据的目的，是为了让新、旧定义之间实现完美对接。

不过，说到完美对接，似乎出现了一个问题。因为要真正实现新、旧定义之间的完美对接，那么重新定义国际单位制的基本单位时，就应该采用相关常数“本该有”的数值，而非国际科学技术数据委员会提供的结果。

为什么这样说呢?

现以数学参量 π 为例来加以说明。对于 π，人们最为熟悉的是它的数值介于 3.141 592 6 与 3.141 592 7 之间，乃南北朝时期的数学家祖冲之(公元 429—500 年)通过“割圆术”求算出来的。设想一下，假如人们一直没能寻找到现如今这些可用于计算 π 的数学公式，那么就只能采用数值 3.141 592 6 或者 3.141 592 7。无论哪种情况，π 都只拥有着 8 位有效数字。对于一般的计算任务而言，8 位有效数字就足够了。但在某些特殊场合，仅有 8 位数字是不够的。举例来说，现打算从拥有 14 位有效数字的里德伯常数中，通过其定义式

$$R_{\infty}=\frac{e^{4}m_{\mathrm{e}}}{8\varepsilon_{0}^{2}h^{3}c}$$

计算出诸如电子电荷或电子质量这类物理量的数值。由于出现在定义式中的 ε_0 包含着 π，而 π 又只能取近似值 3.141 592 6 或者 3.141 592 7，因此在最终的计算结果中，只有前 8 位数字方可采用，这实际上令 R_{∞} 中位于第 9 至第 14 数位上的数字失去了意义。

应该说这几位数字是带有一定含义的，否则人们就没必要将所含的有效数位提升到如此高的水平。因此，在通过 R_∞ 的定义式计算其他物理量时，有必要将后面几位数字所包含的信息完整地转移到计算结果中去。

由此再回到 SI 基本单位的重新定义问题。眼下，人们无法确保由 CODATA 提供的基本物理常数值就是各基本常数本该有的数值，并非 3.141 592 6 或 3.141 592 7 之类的结果。因此，不加考虑地运用 CODATA 提供的数据来重新定义 SI 的基本单位，极有可能将一些误差带入到新定义的单位系统中，进而导致在新单位下得出的物理学结果包含着一定的误差。而误差的存在无疑会加大对结果的解读困难，甚至是引发误读。

若想避免误读情况的发生，最好的办法就是将有关误差从所得结果中分离出来，进而得到一个本征性数值，尔后再对本征数值加以解读；或者，将物理学冻结在有关常数所处的水平上，不再追求更高的目标。后者有违人类的本性，因此剥离误差，找出本征性数值便是人们到时候必然作出的选择。

既然如此，当初何必要引入误差？因此，在重新定义 SI 的基本单位时，人们应该尽最大努力采用有关常数本该具有的数值。但问题是，到哪儿方能寻找到这些数值呢？

困难是显而易见的。按照爱因斯坦的说法，用来定义 SI 基本单位的普朗克常数、基本电荷、阿伏加德罗常数以及玻尔兹曼常数都是些“任意”性结果，不应该存在所谓的“本该有”的数值；无量纲的纯数型常数是可以拥有这类数值的，但由于前文所指出的原因，目前还无法获取这些数值本身。如此说来，问题得到解决的希望很渺茫。

不过，阿伯拉罕・派斯在其撰写的《基本粒子物理学史》一书中，针对有人声索正电子的发现权一事所作出的评论对于“本该有”的数值的找寻工作很可能具有某种启发作用。派斯在书中写道：

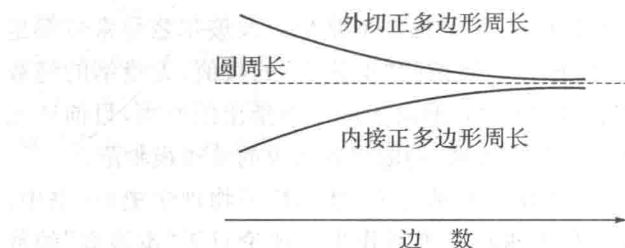
> 很可能有人在安德逊之前就见到过正电子。不过话又得说回来，在牛顿发现引力定律之前，许许多多的人都看到过苹果从树上掉下来。

这句话带给人们的启迪是：有着深刻内涵的物理事件不一定就远在天边而遥不可及，很可能就发生在人们的身边，如“苹果落地”般常见。因此，关注某些司空见惯的现象或触手可及的结果，或许就能有所收获。

受此启发，现来关注 CODATA 所推荐的 4 届基本物理常数推荐值。由于其中的 2002 届数据在有效数位上既少于此前的 1998 届，又少于此后的 2006 和 2010 这两届，因此暂不予考虑。现从余下 3 届推荐值中，摘取电子的荷质比$\frac{e}{m_e}$与真空中特征阻抗 Z_0 相乘，并将计算结果所含的数字与普朗克常数所含的数字相比较，如下表所示。

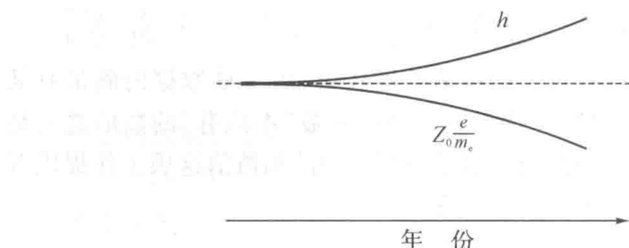
年份	1998	2006	2010
$Z_0\frac{e}{m_e}$	662 600 876	662 600 866	662 600 843
h	662 606 876	662 606 896	662 606 957

不难看到，同期的两个数字序列的前 5 位数是完全相同的，后 4 位数字之间的差异则随着年份的推移而逐渐增大。具体说来，前一个数字序列随着年份的递增而减小，后一个序列则随着年份的递增而增大。这一变化规律很容易让人联想起采用“割园术”求算圆周率 π 时，外切和内接正多边形周长所表现出来的变化规律：随着边数的增加，外切图形的周长逐渐减小，内接的周长逐渐增大，最后趋同于圆的周长。



倘若将上述图形左右翻转一下，就可以很好地描述 $Z_0\frac{e}{m_e}$和 h 所含数字的变化规律：对于 1998 届数据而言，后 4 位数字中有 3 位是相同的，仅有开始的那位不同；在 2006 届中，相同和不同的数字各占 2

位；而到了 2010 届，相同数字一位也没有。



参照上面的图形，可以说 1998 届数据是一个汇合性结果，如同圆周长是外切和内接正多边形周长的汇合点一样。这是否意味着 1998 届的数据可能带有某种特殊性呢?

为此，求取 1998 届数据中的电子电荷、电子质量以及精细结构常数之间的乘积(仅考虑数值部分)：

$$\begin{aligned} e\times m_e\times\alpha^{-1} &= 1.602\ 176\ 462\times10^{-19}\times9.109\ 381\ 88\times10^{-31}\times \\ &\quad 137.035\ 999\ 76 \\ &= 2.000\ 018\ 11\times10^{-47} \end{aligned}$$

容易看到计算结果所含的数字非常接近于整数 2。这一点在该数相对于 2 所给出的相对偏差

$$\begin{aligned} \frac{2.000\ 018\ 11-2}{2} &= \frac{0.000\ 018\ 11}{2} \\ &= 9.055\times10^{-6} \end{aligned}$$

中也得到了很好的体现。

如果进一步求取 1998 届数据中的 $Z_0\dfrac{e}{m_e}$ 与 h 所含数字之间具有的偏差：

$$\begin{aligned} \frac{6.626\ 068\ 76-6.626\ 008\ 76}{6.626\ 068\ 76} &= \frac{0.000\ 060\ 00}{6.626\ 068\ 76} \\ &= 9.055\times10^{-6} \end{aligned}$$

则所得结果正好是前次偏差值 9.055×10^{-6}。这说明在 1998 届数据

下，$Z_0 \frac{e}{m_e}$与 h 所含的数字序列相互汇合并不是一个孤立结果，而是一项具有某种代表性的结果。

从数据特点上讲，以上内容清楚地表明，1998 届数据的确带有某种特殊性。至于这种特殊性与基本物理常数“本该有”的数值之间是否存在着某种联系，以及能否给寻找“本该有”的数值这项工作提供有益的线索，这个问题值得人们考虑。

附录Ⅰ 历届国际计量大会的概况

第二届国际计量大会

时间:1895 年 9 月 9 日—14 日

主要成果:

1. 美国物理学家迈克尔逊报告了他与法国物理学家贝努瓦合作测量镉红线波长的最新结果。

2. 讨论了各国家基准进行定期检定的一些事项。

第三届国际计量大会

时间:1901 年 10 月 15 日—22 日

主要成果:

1. 规定:千克是质量单位,等于国际千克的质量。

2. 规定:体积单位升是在标准大气压力下,质量为 1 千克的纯水在其密度达到最大值时所具有的体积。

3. 约定:标准重力加速度 $g=980.665$ 厘米/秒^2。

第四届国际计量大会

时间:1907 年

主要成果:

确定克拉为质量单位且仅用于珠宝及钻石的交易中。

第五届国际计量大会

时间:1913 年

主要成果:

确定以热力学温标代替氢标准温度计温标,并要求选择一定数量的测温参考点以建立使用温标。

第六届国际计量大会

时间:1921 年 10 月 6 日

主要成果:

主要讨论了国际计量委员会及其下属的国际计量局自身运作的一些问题,同时为国际计量局增加了一项新的任务:确定物理常数的定义。

第七届国际计量大会

时间:1927 年 9 月 27 日—10 月 6 日

主要成果:

1. 规定:长度基本单位米等于 0℃下国际米原器两端三条纵向刻线中居间的那条线之轴向距离。

2. 讨论了意大利科学家 Giorgi 所提出的建议:将米·千克·秒制中的力学单位和实用电学单位结合起来,形成包括长度、质量、时间和一个电学性质的量在内共四个基本单位构成的一贯单位制。

第八届国际计量大会

时间:1933 年 10 月 3 日—10 日

主要成果:

决定以“绝对单位”(由高斯于 1832 年提出的以 CGS 制为基础的单位制)代替“国际电学单位”(由国际电工委员会大会于 1893 年批准建立的 Aint、Ωint 和 Vint 这三个电学单位)。

第九届国际计量大会

时间:1948 年 10 月 12 日—21 日

主要成果:

1. 确定水的三相点为测温参考点,并规定百分度热力学温标的零点低于纯水三相点 0.010 0 度。

2. 确定热量的单位名称为焦耳。

3. 责成国际计量委员会制定出一种所有《米制公约》签约国都愿

意采用的实用单位制。在征询各国科学技术和教育界的意见后，向下一届大会提出“建立实用测量单位制”的建议。

4. 通过了单位符号、数字的书写和印刷规则，并列出了一张具有专门名称的单位表。

第十届国际计量大会

时间：1954 年 10 月 5 日—14 日

主要成果：

1. 约定：1 标准大气压＝1 013 250 达因每平方厘米，即 101 325 牛顿每平方米。

2. 以规定纯水的三相点温度为 273.16 开氏度(°K)这一方式定义了热力学温标。

3. 分别为电流、热力学温度及发光强度引入安培、开尔文和坎德拉这三个基本单位。

4. 决定采用：长度，米(m)；质量，千克(kg)；时间，秒(s)；电流，安培(A)；热力学温度，开氏度(°K)和发光强度，坎德拉(cd)的单位为“实用单位制”的基本单位。

第十一届国际计量大会

时间：1960 年 10 月 11 日—20 日

主要成果：

1. 通过了以回归年为基础的时间基本单位秒的新定义：

1 秒等于 1900 年 1 月 0 日 12 时正回归年长度的 1/31 556 925.974 7。

2. 通过长度基本单位米的新定义：

1 米等于氪-86 原子 2p 与 5d 能级之间跃迁的辐射在真空中波长的 1 650 763.73 倍。

3. 决定在第十届国际计量大会所确定的“实用单位制”的基础上建立国际单位制。该单位制的英文全称为 International System of Units，缩写为 SI。设定了国际单位制中十进倍数和十进分数单位的一组词头名称及符号(从 10^{12} 到 10^{-12})，并制定出了国际单位制的一

些导出单位和辅助单位。

4. 决定在准确的体积测量结果中使用国际单位制中的单位而弃用“升”。

第十二届国际计量大会

时间：1964 年 10 月 6 日—13 日

主要成果：

1. 授权国际计量委员会指定一些临时性原子或分子频率标准，并要求国际上有能力的研究机构开展有关秒的新定义的研究。

2. 建议放射性核素活度的单位使用秒的负 1 次方(s^{-1})。

3. 决定废除体积单位升的原有定义，将其作为立方分米的专门名称。

4. 决定新增两个词头：飞母托(femto，10^{-15}，符号：f)和阿托(atto，10^{-18}，符号：a)。

第十三届国际计量大会

时间：1967 年 10 月 6 日—13 日

主要成果：

1. 通过了以铯原子频率为基础的时间基本单位秒的新定义：

秒是铯－133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁辐射的 9 192 631 770个周期所持续的时间。

2. 通过了发光强度坎德拉的新定义：

坎德拉是在 101 325 牛顿每平方米的压力下，处于铂凝固温度的黑体的 1/600 000 平方米表面在垂直方向上的发光强度。

3. 确定热力学温度单位的名称为开尔文，乃纯水三相点的热力学温度的 1/273.16。废除原有的“开氏度”(符号：°K)和“度”(符号：deg)这两个名称。

第十四届国际计量大会

时间：1971年10月4日—8日

主要成果：

1. 决定新增“物质的量”，相关单位为摩尔，并规定：

(1) 摩尔是一个系统的物质的量，该系统所包含的基本单元数与0.012 kg碳-12所含的原子数目相等，符号为“mol”；

(2) 在使用摩尔时应指明基本单元，它可以是分子、原子、离子、电子及其他粒子，或这些粒子的特定组合；

(3) 摩尔是国际单位制的基本单位。

2. 决定：

(1) 压力的SI单位的专门名称为帕斯卡(符号：Pa)，等于牛顿每平方米；

(2) 电导的SI单位的专门名称为西门子(符号：S)，等于每欧姆。

3. 授权国际计量委员会：

(1) 制定原子时定义，即关于国际原子时标的单位时间间隔的规定；

(2) 协同有关国际组织采取必要的措施尽可能实现国际原子时标。

第十五届国际计量大会

时间：1975年5月27日—6月2日

主要成果：

1. 建议将真空中的光速约定为299 792 458米每秒。

2. 确定“协调世界时”(time coordinated universal, UTC)是全球民用时间的基础。

3. 决定：

(1) 活度的SI单位的专门名称为贝可勒尔(符号：Bq)，等于每秒；

(2) 电离辐射的SI单位的专门名称为戈瑞(符号：Gy)，等于焦耳每千克。

4. 决定新增两个词头：拍它(peta，10^{15}，符号：P)和艾可萨(exa，10^{18}，符号：E)。

第十六届国际计量大会

时间：1979 年 10 月 8 日—12 日

主要成果：

1. 通过了发光强度单位坎德拉的新定义：

坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度。该光源发出频率为 540×10^{12} 赫兹的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 1/683 瓦特每球面度。

2. 决定：

(1) 辐射剂量当量的 SI 单位的专门名称为希沃特(符号：Sv)，等于焦耳每千克；

(2) l 与 L 均可作为体积单位升的现行符号使用。

3. 建议针对外部环境对于千克标准的影响及应对方法展开研究。

4. 建议加强：

(1) 空气浮力对千克标准修正量的测定；

(2) 通过测定物理常数直接或间接实现电学单位这方面的研究。

第十七届国际计量大会

时间：1983 年 10 月 17 日—21 日

主要成果：

1. 通过了长度基本单位米的新定义：

米是真空中的光在 1/299 792 458 秒的时间间隔内所行经的距离。

2. 责成国际计量委员会起草复现米的新定义的有关规定。

第十八届国际计量大会

时间：1987 年 10 月 12 日—15 日

主要成果：

1. 建议将电压单位伏特和电阻单位欧姆建立在约瑟夫森常数 K_J 和冯·克利青常数 R_K 之上。

2. 通过了关于国家千克原器的第三次检定的一些事项。

第十九届国际计量大会

时间：1991 年 9 月 30 日—10 月 3 日

主要成果：

1. 建议对约瑟夫森效应和量子霍尔效应继续展开研究。

2. 要求各国家级实验室迅速采用 1990 国际温标(ITS—90)并努力改善世界范围内温度测量的一致性和长期稳定性。

3. 决定新增词头：泽它(zetta，10^{21}，符号：Z)、仄普托(zepto，10^{-21}，符号：z)、尧它(yotta，10^{24}，符号：Y)、幺科托(yocto，10^{-24}，符号：y)。

第二十届国际计量大会

时间：1995 年 10 月 9 日—13 日

主要成果：

1. 要求有关机构加强对国际千克原器稳定性的监测。

2. 决定取消国际单位制中辅助单位这一分类，只保留基本单位和导出单位这两种。

第二十一届国际计量大会

时间：1999 年 10 月 11 日—15 日

主要成果：

1. 决定：催化活性的专门名称为卡特尔(符号：katal)，等于摩尔每秒。

2. 号召各国家级实验室继续致力于同基本常数或原子常数相联系的质量单位的研究，为将来重新定义质量基本单位千克作准备。

第二十二届国际计量大会

时间:2003 年 10 月 13 日—17 日

主要成果:

会议决定数字中的小数可采用“.”或“,”表示;十进制数字以每三位间隔半个空格表示。

第二十三届国际计量大会

时间:2007 年 11 月 11 日—16 日

主要成果:

会议要求国际计量局及各国计量研究机构积极开展与 SI 基本单位的重新定义有关的研究,以便向第二十四届大会提出正式的建议。

附录Ⅱ 关于SI改制的决议

On the possible future revision of the International System of Units, the SI

Draft Resolution A

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 24th meeting,

considering

- the international consensus on the importance, value, and potential benefits of a redefinition of a number of units of the International System of Units (SI),
- that the national metrology institutes (NMIs) as well as the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) have rightfully expended significant effort during the last several decades to advance the International System of Units (SI) by extending the frontiers of metrology so that SI base units can be defined in terms of the invariants of nature—the fundamental physical constants or properties of atoms,
- that a prominent example of the success of such efforts is the current definition of the SI unit of length, the metre (17th meeting of the CGPM, 1983, Resolution 1), which links it to an exact value of the speed of light in vacuum *c*, namely, 299 792 458 metre per second,
- that of the seven base units of the SI, only the kilogram is still defined in terms of a material artefact, namely, the international prototype of the kilogram (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901), and that the definitions of the am-

pere, mole and candela depend on the kilogram,

- that although the international prototype has served science and technology well since it was sanctioned by the CGPM at its 1st meeting in 1889, it has a number of important limitations, one of the most significant being that its mass is not explicitly linked to an invariant of nature and in consequence its long-term stability is not assured,
- that the CGPM at its 21st meeting in 1999 adopted Resolution 7 in which it recommended that "national laboratories continue their efforts to refine experiments that link the unit of mass to fundamental or atomic constants with a view to a future redefinition of the kilogram",
- that many advances have been made in recent years in relating the mass of the international prototype to the Planck constant h, by methods which include watt balances and measurements of the mass of a silicon atom,
- that the uncertainties of all SI electrical units realized directly or indirectly by means of the Josephson and quantum Hall effects together with the SI values of the Josephson and von Klitzing constants K_J and R_K could be significantly reduced if the kilogram were redefined so as to be linked to an exact numerical value of h, and if the ampere were to be redefined so as to be linked to an exact numerical value of the elementary charge e,
- that the kelvin is currently defined in terms of an intrinsic property of water that, while being an invariant of nature, in practice depends on the purity and isotopic composition of the water used,
- that it is possible to redefine the kelvin so that it is linked to an exact numerical value of the Boltzmann constant k,
- that it is also possible to redefine the mole so that it is linked to an exact numerical value of the Avogadro constant N_A, and is thus

no longer dependent on the definition of the kilogram even when the kilogram is defined so that it is linked to an exact numerical value of h, thereby emphasizing the distinction between amount of substance and mass,

- that the uncertainties of the values of many other important fundamental constants and energy conversion factors would be eliminated or greatly reduced if h, e, k and N_A had exact numerical values when expressed in SI units,
- that the General Conference, at its 23rd meeting in 2007, adopted Resolution 12 in which it outlined the work that should be carried out by the NMIs, the BIPM and the International Committee for Weights and Measures (CIPM) together with its Consultative Committees (CCs) so that new definitions of the kilogram, ampere, kelvin, and mole in terms of fundamental constants could be adopted,
- that, although this work has progressed well, not all the requirements set out in Resolution 12 adopted by the General Conference at its 23rd meeting in 2007 have been satisfied and so the International Committee for Weights and Measures is not yet ready to make a final proposal,
- that, nevertheless, a clear and detailed explanation of what is likely to be proposed can now be presented.

takes note of the intention of the International Committee for Weights and Measures to propose a revision of the SI as follows:

- the International System of Units, the SI, will be the system of units in which:
  - the ground state hyperfine splitting frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu(^{133}\mathrm{Cs})_{\mathrm{hfs}}$ is exactly 9 192 631 770 hertz,
  - the speed of light in vacuum c is exactly 299 792 458 metre per

second,

- the Planck constant h is exactly 6. 626 06X$\times 10^{-34}$ joule second,
- the elementary charge e is exactly 1. 602 17X$\times 10^{-19}$ coulomb,
- the Boltzmann constant k is exactly 1. 380 6X$\times 10^{-23}$ joule per kelvin,
- the Avogadro constant N_A is exactly 6. 022 14X$\times 10^{23}$ reciprocal mole,
- the luminous efficacy K_{cd} of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz is exactly 683 lumen per watt,

where

(i) the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to $Hz = s^{-1}$, $J = m^2\ kg\ s^{-2}$, $C = s\ A$, $lm = cd\ m^2\ m^{-2} = cd\ sr$, and $W = m^2\ kg\ s^{-3}$,

(ii) the symbol X in this Draft Resolution represents one or more additional digits to be added to the numerical values of h, e, k, and N_A, using values based on the most recent CODATA adjustment, from which it follows that the SI will continue to have the present set of seven base units, in particular

- the kilogram will continue to be the unit of mass, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the Planck constant to be equal to exactly 6. 626 06X$\times 10^{-34}$ when it is expressed in the SI unit $m^2\ kg\ s^{-1}$, which is equal to J s,
- the ampere will continue to be the unit of electric current, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the elementary charge to be equal to exactly 1. 602 17X$\times 10^{-19}$ when it is expressed in the SI unit s A, which is equal to C,
- the kelvin will continue to be the unit of thermodynamic tem-

perature, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the Boltzmann constant to be equal to exactly 1.380 6X $\times 10^{-23}$ when it is expressed in the SI unit $m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$, which is equal to $J\ K^{-1}$,

- the mole will continue to be the unit of amount of substance of a specified elementary entity, which may be an atom, molecule, ion, electron, any other particle or a specified group of such particles, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the Avogadro constant to be equal to exactly 6.022 14X $\times 10^{23}$ when it is expressed in the SI unit mol^{-1}.

The General Conference on Weights and Measures
further notes that since

- the new definitions of the kilogram, ampere, kelvin and mole are intended to be of the explicit-constant type, that is, a definition in which the unit is defined indirectly by specifying explicitly an exact value for a well-recognized fundamental constant,
- the existing definition of the metre is linked to an exact value of the speed of light in vacuum, which is also a well-recognized fundamental constant,
- the existing definition of the second is linked to an exact value of a well-defined property of the caesium atom, which is also an invariant of nature,
- although the existing definition of the candela is not linked to a fundamental constant, it may be viewed as being linked to an exact value of an invariant of nature,
- it would enhance the understandability of the International System if all of its base units were of similar wording.

the International Committee for Weights and Measures will also propose the reformulation of the existing definitions of the second, me-

tre and candela in completely equivalent forms, which might be the following:

- the second, symbol s, is the unit of time; its magnitude is set by fixing the numerical value of the ground state hyperfine splitting frequency of the caesium 133 atom, at rest and at a temperature of 0 K, to be equal to exactly 9 192 631 770 when it is expressed in the SI unit s^{-1}, which is equal to Hz,
- the metre, symbol m, is the unit of length; its magnitude is set by fixing the numerical value of the speed of light in vacuum to be equal to exactly 299 792 458 when it is expressed in the SI unit $m\ s^{-1}$,
- the candela, symbol cd, is the unit of luminous intensity in a given direction; its magnitude is set by fixing the numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz to be equal to exactly 683 when it is expressed in the SI unit $m^{-2}\ kg^{-1}\ s^{3}$ cd sr, or cd sr W^{-1}, which is equal to lm W^{-1}.

In this way, the definitions of all seven base units will be seen to follow naturally from the set of seven constants given above.

In consequence, on the date chosen for the implementation of the revision of the SI:

- the definition of the kilogram in force since 1889 based upon the mass of the international prototype of the kilogram (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901) will be abrogated,
- the definition of the ampere in force since 1948 (9th meeting of the CGPM, 1948) based upon the definition proposed by the International Committee (CIPM, 1946, Resolution 2) will be abrogated,
- the conventional values of the Josephson constant K_{J-90} and of

the von Klitzing constant R_{K-90} adopted by the International Committee (CIPM, 1988, Recommendations 1 and 2) at the request of the General Conference (18th meeting of the CGPM, 1987, Resolution 6) for the establishment of representations of the volt and the ohm using the Josephson and quantum Hall effects, respectively, will be abrogated,

- the definition of the kelvin in force since 1967/1968 (13th meeting of the CGPM, 1967/1968, Resolution 4) based upon a less explicit, earlier definition (10th meeting of the CGPM, 1954, Resolution 3) will be abrogated,
- the definition of the mole in force since 1971 (14th meeting of the CGPM, 1971, Resolution 3) based upon a definition whereby the molar mass of carbon 12 had the exact value 0.012 kg mol^{-1} will be abrogated,
- the existing definitions of the metre, second and candela in force since they were adopted by the CGPM at its 17th (1983, Resolution 1), 13th (1967/1968, Resolution 1) and 16th (1979, Resolution 3) meetings, respectively, will be abrogated.

The General Conference on Weights and Measures
further notes that on the same date

- the mass of the international prototype of the kilogram $m(\mathcal{K})$ will be exactly 1 kg but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of h just before redefinition and that subsequently its value will be determined experimentally,
- that the magnetic constant (permeability of vacuum) μ_0 will be exactly $4\pi \times 10^{-7}$ H m^{-1} but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of the fine-structure constant and that subsequently its value will be determined experimentally,

- that the thermodynamic temperature of the triple point of water T_{TPW} will be exactly 273.16 K but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of k just before redefinition and that subsequently its value will be determined experimentally,
- that the molar mass of carbon 12 $M(^{12}C)$ will be exactly 0.012 kg mol^{-1} but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of N_A just before redefinition and that subsequently its value will be determined experimentally.

The General Conference on Weights and Measures

encourages

- researchers in national metrology institutes, the BIPM and academic institutions to continue their efforts and make known to the scientific community in general and to CODATA in particular, the outcome of their work relevant to the determination of the constants h, e, k, and N_A, and
- the BIPM to continue its work on relating the traceability of the prototypes it maintains to the international prototype of the kilogram, and in developing a pool of reference standards to facilitate the dissemination of the unit of mass when redefined,

invites

- CODATA to continue to provide adjusted values of the fundamental physical constants based on all relevant information available and to make the results known to the International Committee through its Consultative Committee for Units since these CODATA values and uncertainties will be those used for the revised SI,
- the CIPM to make a proposal for the revision of the SI as soon as the recommendations of Resolution 12 of the 23rd meeting of the General Conference are fulfilled, in particular the preparation of

mises en pratique for the new definitions of the kilogram, ampere, kelvin and mole,

- the CIPM, the Consultative Committees, the BIPM and National Metrology Institutes significantly to increase their efforts to initiate awareness campaigns aimed at alerting user communities and the general public to the intention to redefine various units of the SI and to encourage consideration of the practical, technical, and legislative implications of such redefinitions, so that comments and contributions can be solicited from the wider scientific and user communities.

附录Ⅲ 历届基本物理常数推荐值(简表)

1998年基本物理常数推荐值简表

物理量	符号	数值	单位	相对标准不确定度
真空中光速	c,c_0	299 792 458	$\mathrm{m\ s^{-1}}$	(精确)
磁常数	μ_0	$4\pi\times10^{-7}$	$\mathrm{N\ A^{-2}}$	(精确)
		$=12.566\ 370\ 614\cdots\times10^{-7}$	$\mathrm{N\ A^{-2}}$	(精确)
电常数$1/\mu_0c^2$	ε_0	$8.854\ 187\ 817\cdots\times10^{-12}$	$\mathrm{F\ m^{-1}}$	(精确)
真空中特征阻抗μ_0c	Z_0	$376.730\ 313\ 461\cdots$	Ω	(精确)
牛顿引力常数	G	$6.673(10)\times10^{-11}$	$\mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}$	1.5×10^{-3}
普朗克常数	h	$6.626\ 068\ 76(52)\times10^{-34}$	$\mathrm{J\ s}$	7.8×10^{-8}
	$\hbar$	$1.054\ 571\ 596(82)\times10^{-34}$	$\mathrm{J\ s}$	7.8×10^{-8}
基本电荷	e	$1.602\ 176\ 462(63)\times10^{-19}$	C	3.9×10^{-8}
磁通量子	Φ_0	$2.067\ 833\ 667(81)\times10^{-15}$	Wb	3.9×10^{-8}
电导量子	G_0	$7.748\ 091\ 696(28)\times10^{-5}$	S	3.7×10^{-9}
电子质量	m_e	$9.109\ 381\ 88(72)\times10^{-31}$	kg	7.9×10^{-8}
质子质量	m_p	$1.672\ 621\ 58(13)\times10^{-27}$	kg	7.9×10^{-8}
质子-电子质量比	m_p/m_e	$1\ 836.152\ 6675(39)$		2.1×10^{-9}
精细结构常数	α	$7.297\ 352\ 533(27)\times10^{-3}$		3.7×10^{-9}
	α^{-1}	$137.035\ 999\ 76(50)$		3.7×10^{-9}
里德伯常数	R_∞	$10\ 973\ 731.568\ 549(83)$	$\mathrm{m^{-1}}$	7.6×10^{-12}
阿伏加德罗常数	N_A,L	$6.022\ 141\ 99(47)\times10^{23}$	$\mathrm{mol^{-1}}$	7.9×10^{-8}
法拉第常数	F	$96\ 485.341\ 5(39)$	$\mathrm{C\ mol^{-1}}$	4.0×10^{-8}
摩尔气体常数	R	$8.314\ 472(15)$	$\mathrm{J\ mol^{-1}\ K^{-1}}$	1.7×10^{-6}
玻尔兹曼常数	k	$1.380\ 650\ 3(24)\times10^{-23}$	$\mathrm{J\ K^{-1}}$	1.7×10^{-6}
斯特藩-玻尔兹曼常数	σ	$5.670\ 400(40)\times10^{-8}$	$\mathrm{W\ m^{-2}\ K^{-4}}$	7.0×10^{-6}
电子伏	eV	$1.602\ 176\ 462(63)\times10^{-19}$	J	3.9×10^{-8}
原子质量单位	u	$1.660\ 538\ 73(13)\times10^{-27}$	kg	7.9×10^{-8}

2002年基本物理常数推荐值简表

物理量	符号	数值	单位	相对标准不确定度
真空中光速	c, c_0	299 792 458	$\mathrm{m\ s^{-1}}$	(精确)
磁常数	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	$\mathrm{N\ A^{-2}}$	(精确)
		$=12.566\ 370\ 614\cdots \times 10^{-7}$	$\mathrm{N\ A^{-2}}$	(精确)
电常数$1/\mu_0 c^2$	ε_0	$8.854\ 187\ 817\cdots \times 10^{-12}$	$\mathrm{F\ m^{-1}}$	(精确)
真空中特征阻抗$\mu_0 c$	Z_0	$376.730\ 313\ 461\cdots$	Ω	(精确)
牛顿引力常数	G	$6.674\ 2(10) \times 10^{-11}$	$\mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}$	1.5×10^{-4}
普朗克常数	h	$6.626\ 069\ 3(11) \times 10^{-34}$	$\mathrm{J\ s}$	1.7×10^{-7}
	$\hbar$	$1.054\ 571\ 68(18) \times 10^{-34}$	$\mathrm{J\ s}$	1.7×10^{-7}
基本电荷	e	$1.602\ 176\ 53(14) \times 10^{-19}$	C	8.5×10^{-8}
磁通量子	Φ_0	$2.067\ 833\ 72(18) \times 10^{-15}$	Wb	8.5×10^{-8}
电导量子	G_0	$7.748\ 091\ 733(26) \times 10^{-5}$	S	3.3×10^{-9}
电子质量	m_e	$9.109\ 382\ 6(16) \times 10^{-31}$	kg	1.7×10^{-7}
质子质量	m_p	$1.672\ 621\ 71(29) \times 10^{-27}$	kg	1.7×10^{-7}
质子-电子质量比	m_p/m_e	1 836.152 672 61(85)		4.6×10^{-10}
精细结构常数	α	$7.297\ 352\ 568(24) \times 10^{-3}$		3.3×10^{-9}
	α^{-1}	137.035 999 11(46)		3.3×10^{-9}
里德伯常数	R_∞	10 973 731.568 525(73)	$\mathrm{m^{-1}}$	6.6×10^{-12}
阿伏加德罗常数	N_A, L	$6.022\ 141\ 5(10) \times 10^{23}$	$\mathrm{mol^{-1}}$	1.7×10^{-7}
法拉第常数	F	96 485.338 3(83)	$\mathrm{C\ mol^{-1}}$	8.6×10^{-8}
摩尔气体常数	R	8.314 472(15)	$\mathrm{J\ mol^{-1}\ K^{-1}}$	1.7×10^{-6}
玻尔兹曼常数	k	$1.380\ 650\ 5(24) \times 10^{-23}$	$\mathrm{J\ K^{-1}}$	1.8×10^{-6}
斯特藩-玻尔兹曼常数	σ	$5.670\ 400(40) \times 10^{-8}$	$\mathrm{W\ m^{-2}\ K^{-4}}$	7.0×10^{-6}
电子伏	eV	$1.602\ 176\ 53(14) \times 10^{-19}$	J	8.5×10^{-8}
原子质量单位	u	$1.660\ 538\ 86(28) \times 10^{-27}$	kg	1.7×10^{-7}

2006 年基本物理常数推荐值简表

物理量	符号	数值	单位	相对标准不确定度
真空中光速	c, c_0	299 792 458	$m\ s^{-1}$	（精确）
磁常数	μ_0	$4\pi\times10^{-7}$	$N\ A^{-2}$	（精确）
		$=12.566\ 370\ 614\cdots\times10^{-7}$	$N\ A^{-2}$	（精确）
电常数$1/\mu_0 c^2$	ϵ_0	$8.854\ 187\ 817\cdots\times10^{-12}$	$F\ m^{-1}$	（精确）
真空中特征阻抗 $\mu_0 c$	Z_0	$376.730\ 313\ 461\cdots$	Ω	（精确）
牛顿引力常数	G	$6.673(10)\times10^{-11}$	$m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$	1.5×10^{-3}
普朗克常数	h	$6.626\ 068\ 96(33)\times10^{-34}$	$J\ s$	5.0×10^{-8}
	$\hbar$	$1.054\ 571\ 628(53)\times10^{-34}$	$J\ s$	5.0×10^{-8}
基本电荷	e	$1.602\ 176\ 487(40)\times10^{-19}$	C	2.5×10^{-8}
磁通量子	Φ_0	$2.067\ 833\ 667(52)\times10^{-15}$	Wb	2.5×10^{-8}
电导量子	G_0	$7.748\ 091\ 700\ 4(53)\times10^{-5}$	S	6.8×10^{-10}
电子质量	m_e	$9.109\ 382\ 15(45)\times10^{-31}$	kg	5.0×10^{-8}
质子质量	m_p	$1.672\ 621\ 637(83)\times10^{-27}$	kg	5.0×10^{-8}
质子-电子质量比	m_p/m_e	1836.152 672 47(80)		4.3×10^{-10}
精细结构常数	α	$7.297\ 352\ 537\ 6(50)\times10^{-3}$		6.8×10^{-10}
	α^{-1}	137.035 999 679(94)		6.8×10^{-10}
里德伯常数	R_∞	10 973 731.568 527(73)	m^{-1}	6.6×10^{-12}
阿伏加德罗常数	N_A, L	$6.022\ 141\ 79(30)\times10^{23}$	mol^{-1}	5.0×10^{-8}
法拉第常数	F	96 485.339 9(24)	$C\ mol^{-1}$	2.5×10^{-8}
摩尔气体常数	R	8.314 472(15)	$J\ mol^{-1}\ K^{-1}$	1.7×10^{-6}
玻尔兹曼常数	k	$1.380\ 650\ 4(24)\times10^{-23}$	$J\ K^{-1}$	1.7×10^{-6}
斯特藩-玻尔兹曼常数	σ	$5.670\ 400(40)\times10^{-8}$	$W\ m^{-2}\ K^{-4}$	7.0×10^{-6}
电子伏	eV	$1.602\ 176\ 487(40)\times10^{-19}$	J	2.5×10^{-8}
原子质量单位	u	$1.660\ 538\ 782(83)\times10^{-27}$	kg	5.0×10^{-8}

2010 年基本物理常数推荐值简表

物理量	符号	数值	单位	相对标准不确定度
真空中光速	c, c_0	299 792 458	$\mathrm{m\ s^{-1}}$	(精确)
磁常数	μ_0	$4\pi\times10^{-7}$	$\mathrm{N\ A^{-2}}$	(精确)
		$=12.566\ 370\ 614\cdots\times10^{-7}$	$\mathrm{N\ A^{-2}}$	(精确)
电常数$1/\mu_0 c^2$	ε_0	$8.854\ 187\ 817\cdots\times10^{-12}$	$\mathrm{F\ m^{-1}}$	(精确)
真空中特征阻抗 $\mu_0 c$	Z_0	$376.730\ 313\ 461\cdots$	Ω	(精确)
牛顿引力常数	G	$6.67384(80)\times10^{-11}$	$\mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}$	1.4×10^{-4}
普朗克常数	h	$6.626\ 069\ 57(29)\times10^{-34}$	$\mathrm{J\ s}$	4.4×10^{-8}
	$\hbar$	$1.054\ 571\ 726(47)\times10^{-34}$	$\mathrm{J\ s}$	4.4×10^{-8}
基本电荷	e	$1.602\ 176\ 565(35)\times10^{-19}$	C	2.2×10^{-8}
磁通量子	Φ_0	$2.067\ 833\ 758(46)\times10^{-15}$	Wb	2.2×10^{-8}
电导量子	G_0	$7.748\ 091\ 734\ 6(25)\times10^{-5}$	S	3.2×10^{-10}
电子质量	m_e	$9.109\ 382\ 91(40)\times10^{-31}$	kg	4.4×10^{-8}
质子质量	m_p	$1.672\ 621\ 777(74)\times10^{-27}$	kg	4.4×10^{-8}
质子-电子质量比	m_p/m_e	1 836.152 672 45(75)		4.1×10^{-10}
精细结构常数	α	$7.297\ 352\ 569\ 8(24)\times10^{-3}$		3.2×10^{-10}
	α^{-1}	137.035 999 074(44)		3.2×10^{-10}
里德伯常数	R_∞	10 973 731.568 539(55)	$\mathrm{m^{-1}}$	5.0×10^{-12}
阿伏加德罗常数	N_A, L	$6.022\ 141\ 29(27)\times10^{23}$	$\mathrm{mol^{-1}}$	4.4×10^{-8}
法拉第常数	F	96 485.336 5(21)	$\mathrm{C\ mol^{-1}}$	2.2×10^{-8}
摩尔气体常数	R	8.314 462 1(75)	$\mathrm{J\ mol^{-1}\ K^{-1}}$	9.1×10^{-7}
玻尔兹曼常数	k	$1.380\ 648\ 8(13)\times10^{-23}$	$\mathrm{J\ K^{-1}}$	9.1×10^{-7}
斯特藩-玻尔兹曼常数	σ	$5.670\ 373(21)\times10^{-8}$	$\mathrm{W\ m^{-2}\ K^{-4}}$	3.6×10^{-6}
电子伏	eV	$1.602\ 176\ 565(35)\times10^{-19}$	J	2.2×10^{-8}
原子质量单位	u	$1.660\ 538\ 921(13)\times10^{-27}$	kg	4.4×10^{-8}

[General Information]
书名=国际单位制与基本物理常数
作者=张常山编著
页数=91
SS号=13693759
DX号=
出版日期=2014.12
出版社=东南大学出版社